

Редколис Е. В., Бердонос В. Д.
E.V.Redkolis, V.D.Berdonosov

**ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ ОКАЗАНИЯ
МУНИЦИПАЛЬНЫХ УСЛУГ. ПРЕДПОСЫЛКИ. ТРЕБОВАНИЯ**

**BUILDING OPTIMALLY EFFICIENT BUSINESS PROCESSES OF A MUNICIPAL SER-
VICES SYSTEM. STRUCTURAL PREREQUISITES. REQUIREMENTS**



Редколис Елена Валерьевна – аспирант кафедры «Информационные системы» ФГБОУ ВПО «КНАГТУ» (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Октябрьский, 10 – 58; +7 (924) 2257042.

E-mail: Lulumzja@mail.ru.

Ms. Elena V. Redkolis – PhD candidate, Department of Information Systems, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. 681013, Komsomolsk-on-Amur, October's Pr. 10 – 58. Mobile: +7 (924) 2257042. E-mail: Lulumzja@mail.ru.



Бердонос Виткор Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Информационные системы» ФГБОУ ВПО «КНАГТУ» (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681024, Комсомольск-на-Амуре, пр. Интернациональный, 59 – 5; +7 (962) 2875141. E-mail: ktriz@knastu.ru.

Mr. Victor D. Berdonosov – PhD, Associate Professor, Department of Information Systems, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. 681024, Komsomolsk-on-Amur, International Av. 59 – 5. Mobile: +7 (962) 2875141. E-mail: ktriz@knastu.ru.

Аннотация. Формирование системы электронного правительства – трудоемкий процесс, порождающий проблемы, решение которых невозможно осуществить без применения информационных технологий. Как система электронное правительство разворачивается по стадиям жизненного цикла. В статье рассматриваются проблемы, возникающие на стадиях «формирование требований» и «проектирование» в развитии электронного правительства. Идет речь о возможности совместного применения существующей CASE-системы и новой проектируемой системы для решения проблем разработки и постоянного обновления в соответствии с нормативно-правовыми актами текстов административных регламентов, а также диаграмм бизнес-процессов оказания электронных муниципальных услуг. Описывается структура проектируемой системы, требования к входным данным.

Summary. Development of an e-government system is a painstaking process that generates problems whose resolution can't be carried out without application of IT technology. As a system, e-government is deployed by life-cycle stages. The paper considers problems arising during such stages of e-government development process as «requirements definition» and «engineering design». The paper considers a possibility of using the existing CASE-system and the new projected system jointly for the purpose of solving engineering/development problems and for ongoing update of relevant administrative regulations in compliance with statutory legal acts, as well as business processes diagrams of the system of electronic municipal services. The projected system's structure and requirements for input data are described.

Ключевые слова: CASE, жизненный цикл программного обеспечения, бизнес-процесс, оптимизация, электронное правительство.

Key words: CASE, software life cycle, business process, optimization, e-government.

УДК 004.422

Введение

В настоящее время в Российской Федерации активно разрабатывается и вводится в действие система электронного правительства (ЭП) [2].

При рассмотрении ЭП как системы можно выделить стадии жизненного цикла (ЖЦ), через которые проходит ЭП. Прохождение каждой стадии ставит определенные цели, задачи и порождает ряд проблем, решение которых позволяет достичь наиболее оптимального функционирования системы на данной стадии.

В статье рассматриваются общие понятия, касающиеся оказания муниципальных услуг (МУ) в электронном виде. Определяются стадии ЖЦ, которые проходит система ЭП. Подвергаются более подробному рассмотрению стадии «формирование требований» и «проектирование».

Идет речь о возможности совместного применения существующей CASE-системы и новой проектируемой системы, интегрируемой с существующей, для решения проблем разработки и постоянного обновления административных регламентов (АР) и диаграмм бизнес-процессов (БП), представленных в стандартах оказания МУ в электронном виде (СЭУ).

Дается общее представление о проектируемой ИС. Рассматриваются проблемы формализации БП на этапе, предшествующем обработке проектируемой системой текстов АР и диаграмм БП. Определяются требования к предварительно формализованным БП.

Оказание муниципальных услуг в электронном виде

ЭП – новая форма организации деятельности органов государственной власти, обеспечивающая за счет широкого применения информационных технологий (ИТ) качественно новый уровень оперативности и удобства получения заявителями услуг и информации о результатах деятельности государственных органов [2]. В рамках ЭП государство оказывает электронные государственные и муниципальные услуги заявителям.

Далее будем рассматривать муниципальный уровень оказания услуг.

МУ – услуга, предоставляемая органом местного самоуправления, осуществляемая по запросам заявителей, касаясь решения вопросов местного значения, установленных в соответствии с № 131-ФЗ от 6 октября 2003 г. и уставами муниципальных образований [4].

Жизненный цикл системы ЭП

ЭП представляет собой высокоинтегрированную систему взаимодействия заявителей и исполнителей МУ на основе ИТ в соответствии с действующими нормативно-правовыми актами (НПА). Как система ЭП проходит следующие *стадии ЖЦ*: формирование требований, проектирование, реализация, тестирование и отладка, внедрение, сопровождение, эксплуатация.

Рассмотрим ЭП в рамках двух основополагающих, по мнению авторов, стадий ЖЦ – «формирование требований» и «проектирование». На данных стадиях решаются *задачи* разработки и подготовки:

- 1) НПА, регламентирующих функционирование ЭП;
- 2) НПА, обеспечивающих оказание МУ;
- 3) АР и СЭУ;
- 4) единых требований к обслуживанию заявителей;
- 5) средств обеспечения удаленного доступа заявителей к информации о деятельности

органов государственной власти и т.д. Наиболее интересной для научного исследования представляется третья задача – разработка АР и СЭУ, которую рассмотрим далее.

Проблемы разработки АР и СЭУ

Реальный БП постоянно изменяется под влиянием на деятельность учреждения, в рамках которого он выполняется, факторов внешней среды. Кроме того, на БП оказывают влияние другие БП данного учреждения, имеющие общие ресурсы, а также прямо или косвенно связанные с исследуемым БП входами или выходами. Формализованное же представление БП – диаграмма БП – в большинстве случаев является статичным и не меняется с течением значительного отрезка времени. Аналогично обстоит дело и с БП оказания МУ.

Выполнение БП оказания МУ должно происходить в полном соответствии с АР. АР – НПА, устанавливающий порядок и стандарт предоставления услуги [4]. АР в своем роде является паттерном, определяющим конфигурацию взаимоотношений государства и заявителей по поводу предоставления МУ [7]. Он содержит перечень НПА, на базе которых осуществляется предоставление МУ. Однако необходимо отметить, что структура и содержание АР подвергаются постоянным изменениям ввиду регулярного обновления НПА.

СЭУ – документ, описывающий требования к характеристикам и процессам оказания в электронной форме существующей или вновь вводимой МУ, порядок перевода существующей МУ на электронную форму оказания, способы сопряжения процессов оказания услуг в электронной и традиционной формах [6].

Таким образом, в процессе разработки АР и СЭУ (которые содержат, помимо текстовых описаний, иллюстративный материал – диаграммы оказания МУ), возникают *проблемы*:

- 1) выработка механизма проверки согласованности НПА, обеспечивающих выполнение определенной МУ [2];
- 2) выработка механизма автоматизированной проверки соответствия АР БП перечню НПА, обеспечивающих выполнение МУ по данному БП;
- 3) сокращение количества документов, предоставляемых заявителями для исполнения МУ [2; 5];
- 4) сокращение срока исполнения МУ, а также сроков исполнения отдельных административных процедур и действий в рамках исполнения МУ [5];
- 5) выработка механизма проверки логической связанности и непротиворечивости содержания АР БП [2; 5];
- 6) разработка способа выявления отдельных аспектов оказания МУ, не регламентированных действующими НПА [2];
- 7) отсутствие механизма перехода от диаграмм БП, построенных на базе устаревших АР, к диаграммам, построенным по более актуальным или вновь принятым АР.

Проектирование системы формирования оптимальных БП оказания МУ

Реалии таковы, что решения данных проблем невозможно достичь на уровне, требуемом действующими НПА, без применения CASE-систем (от англ. «Computer Aided Software Engineering»). С помощью таких систем решаются задачи проектирования, анализа и преобразований моделей БП.

Функционал современных CASE-систем довольно обширен, а количество осуществляемых функций исчисляется десятками. Однако рассмотрение авторами около двух сотен реальных CASE-систем [1] позволяет сделать выводы о недостаточно глубокой проработке следующего функционала: синтаксический и семантический контроль спецификаций, разработка клиент-серверных приложений, регрессионное тестирование, оптимизация.

Решение названных выше проблем ЭП достигается путем проектирования на базе существующей CASE-системы формирования оптимальных БП. Причем под *оптимизацией* авторами понимается совокупность мероприятий по приведению в соответствие с изменяющимися требованиями внешней среды логики регламентов и диаграмм БП, сопровождающаяся повышением эффективности регламентов и диаграмм БП. *Оптимальность* – степень соответствия регламентов и диаграмм БП требованиям внешней среды.

Оптимизация осуществляется на уровнях:

- АР, являющихся основой для функционирования любого БП оказания МУ;
- диаграмм БП оказания МУ.

CASE-система формирования оптимальных БП оказания МУ («FORMS») реализует *функционал, ранее не развитый в CASE-системах*, – связывает фрагменты текстов АР БП с графическими примитивами нотаций IDEF3, DFD (в которых проводится моделирование БП оказания МУ), а также выполняет строковый анализ текстов НПА и АР БП с целью выявления необходимых трансформаций в текстах АР и диаграммах БП оказания МУ.

Регулярное осуществление упомянутых выше трансформаций диаграмм БП, а также изменение текстов АР позволит формировать оптимальные БП оказания МУ.

Проектируемая «FORMS» включает пять основных модулей (А1 – А5):

А1 – Проверка согласованности НПА;

А2 – Проверка соответствия АР БП перечню НПА;

А3 – Интеграция с системой межведомственного взаимодействия (МВ);

А4 – Проверка логической связанности и достаточности формулировок АР;

А5 – Формирование актуальных диаграмм БП.

Ниже представлены примеры диаграмм верхних уровней детализации в нотациях DFD, IDEF3, описывающих логику действия модулей системы (см. рис. 1 – 2).

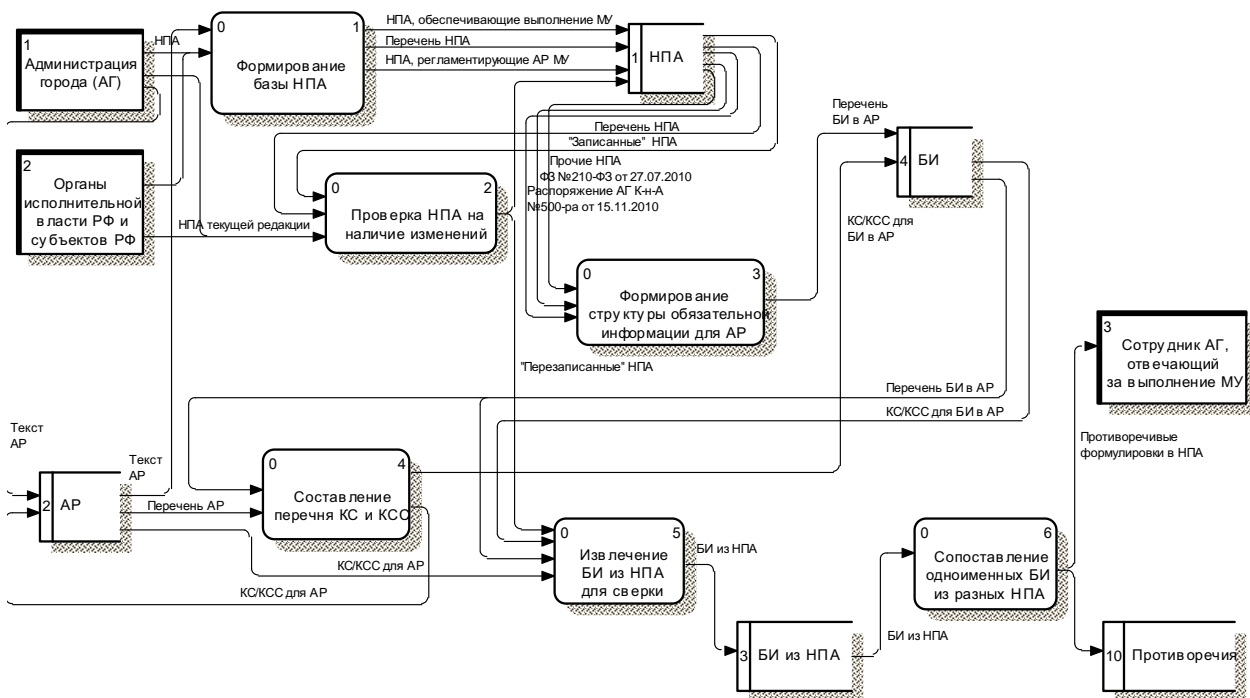


Рис. 1. Модуль А1 «Проверка согласованности НПА»

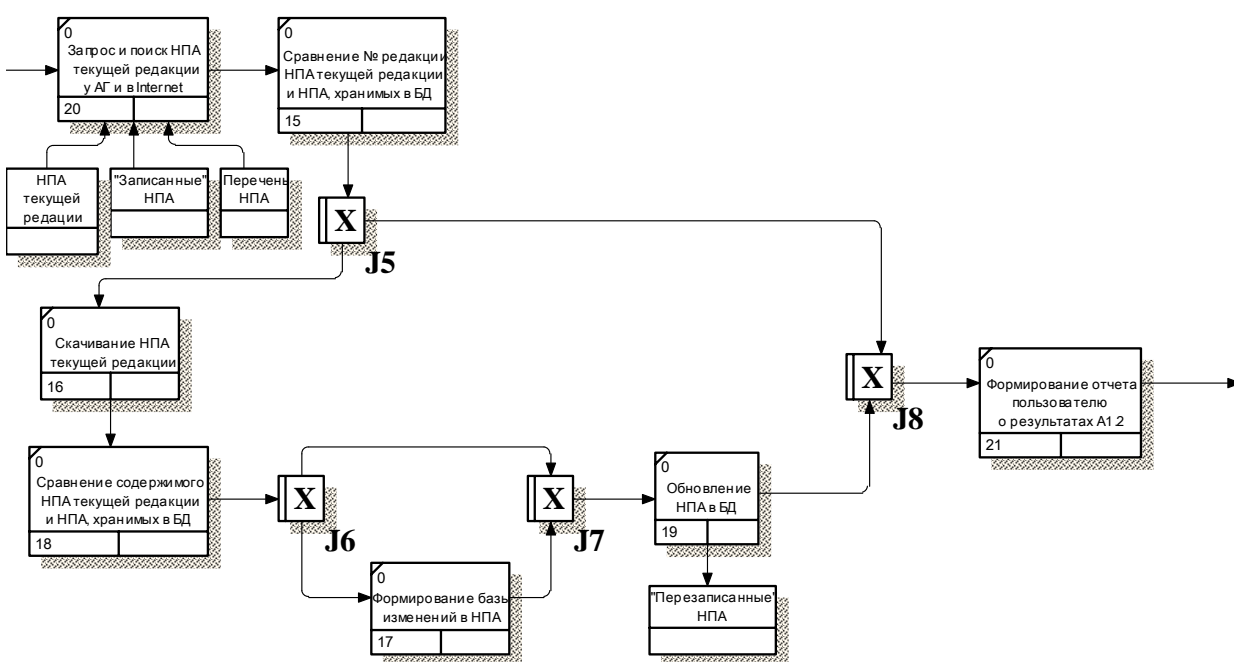


Рис. 2. Модуль А1.2 «Проверка НПА на наличие изменений»



Для возможности формализованного описания функционирования «FORMS» были введены следующие категории понятий.

Ключевое слово (КС) – слово, выраженное существительным, наиболее полно идентифицирующее определенный БИ в АР.

Ключевое словосочетание (КСС) – два или более слов, состоящих из одного КС и одного или более определений, обстоятельств, дополнений, связанных между собой и с КС по смыслу, служащие идентификатором определенного БИ в АР.

Блок информации (БИ) в АР – обязательный раздел АР, содержание, местоположение и обозначение которого определяются актуальными НПА. На 01.08.2011 такими НПА, регламентирующими структуру АР МУ, выступают [3; 4; 5].

В общем случае АР содержит разделы, устанавливающие [4]:

- 1) общие положения;
- 2) стандарт предоставления услуги;
- 3) состав, последовательность и сроки выполнения административных процедур, требования к порядку их выполнения, в том числе особенности выполнения административных процедур в электронной форме;
- 4) формы контроля за исполнением АР;
- 5) досудебный (внесудебный) порядок обжалования решений и действий (бездействия) органов, предоставляющих услугу, а также должностных лиц.

Каждый раздел формируется из нескольких БИ. В ходе исследования реальных примеров для АР МУ было выделено двадцать семь БИ.

Выбор нотации для формализации БП

Выбор нотации для первоначальной формализации БП сужает круг существующих CASE-систем, подходящих для интеграции с проектируемой «FORMS» с целью решения проблем, названных в предыдущем разделе.

Формализация АР в нотации IDEF0 позволила сделать вывод о том, что IDEF0 не является максимально пригодной нотацией по следующим причинам:

– текст АР содержит недостаточно подробные описания, что не позволяет разбить все диаграммы в нотации IDEF0 на одинаковое количество уровней детализации. Подробная детализация БП оказания МУ в нотации IDEF0 требует опроса сотрудников АГ, непосредственно оказывающих МУ, а также детального изучения положений об этих подразделениях. Проблема решается нотацией *IDEF3*;

– нотация IDEF0 не позволяет в явном виде указывать внешние по отношению к рассматриваемому БП сущности (пример – отображение организаций, задействованных в МВ), а также – наглядно отобразить обратные связи между рассматриваемым БП и внешними сущностями: из-за отсутствия сущности границы петли обратной связи становятся не явными. Проблемы решаются нотацией *DFD*;

– в зависимости от целей заявителя и набора подаваемых документов варьируется последовательность БП оказания МУ. Для рассмотрения «альтернативного» БП в IDEF0 на низком уровне детализации необходимо предусмотреть дублирование на уровнях выше, что приведет к неоправданно большому количеству вложенности таких уровней. Решение проблемы – описание альтернативных исходов БП с помощью логических правил в *IDEF3*;

– IDEF0 не позволяет отразить логику выполнения административных процедур и действий, что приводит к невозможности формализовать в виде диаграмм большинство БИ в АР. Проблема решается нотацией *IDEF3*.

Структура формализуемого текста АР

Оценим долю текста АР, потенциально формализуемую при помощи выбранных нотаций. Опыт формализации текстов реальных АР позволяет отобразить примерную структуру формализованных текстов, а также выявить проблемы, возникающие при формировании диаграмм БП на базе АР (см. табл. 1).

Структура формализуемого текста АР

| Название объекта (группы объектов) на диаграмме БП | Нотации моделирования | Доля текста АР, формализуемая данными объектами, (%) |
|---|-----------------------|--|
| 1. Свойства модели (Model Properties) – Цель (Purpose) | IDEF0, IDEF3, DFD | 0,6 |
| 2. Работы (Activity) | DFD | 9,3 |
| 3. Внешние сущности (External Reference) | DFD | 0,7 |
| 4. Свойства внешних сущностей (External Reference Properties) – UDP Values | DFD | 1,4 |
| 5. Хранилища данных (Data Store) | DFD | 1,6 |
| 6. Работы (Activity) | IDEF3 | 8,0 |
| 7. Свойства работ (Activity Properties) – свойства, задаваемые пользователем (UDP Values) | IDEF3, DFD | 6,1 |
| 8. Свойства информационных потоков (Arrow Properties) – UDP Values | IDEF3, DFD | 1,3 |
| 9. Информационные потоки (Arrow) | IDEF3, DFD | 18,1 |
| 10. Свойства информационных потоков / работ (Arrow/Activity Properties) – Definition, блоки Note/Definition | IDEF3, DFD | 15,7 |
| 11. Стиль Arrow – Object Flow | IDEF3, DFD | 0,2 |
| 12. Свойства информационных потоков (Arrow Properties) – UOW (Objects) | IDEF3, DFD | 7,5 |
| 13. Связанные объекты (Referent Tool) | IDEF3 | 0,1 |
| 14. Информация, не поддающаяся формализации в СА ERwin Process Modeler | IDEF0, IDEF3, DFD | 1,2 |
| 15. Информация, не поддающаяся формализации | – | 28,2 |

Наибольшие проблемы создает формализация информации в п. 10 и п. 14 (см. табл. 1). Текст АР из п. 14 желателен для формализации в виде объектов диаграмм БП и связанных с ними атрибутов. Однако, сделать это невозможно по следующим причинам:

- значения некоторых свойств до занесения в базу данных (БД) требуют предварительной экспертной оценки (например, показатели качества, оценки доступности МУ и др.) – без проведения такой оценки хранение данных показателей не имеет практической значимости;

- в тексте АР могут вскользь упоминаться работы, принадлежащие к явно самостоятельным БП, в то время как какое-либо описание самих БП отсутствует;

- некоторые словесные формулировки в АР недостаточно конкретны, что не позволяет определить точно объект диаграммы, к которому относится формулировка.

Негативные воздействия перечисленных причин при необходимости можно устранить с помощью беседы с непосредственными исполнителями МУ. Таким образом, для обеспечения требуемого уровня детализации и логической непротиворечивости диаграмм БП оказания МУ их разработка должна проводиться не только на основании АР, но и на основании личного опыта и тонких нюансов работы сотрудников, исполняющих МУ.

Текст АР в п. 10 (см. табл. 1) нельзя считать в полной мере формализованным, так как он сохраняет свою литературную основу и заносится в справочные атрибуты объектов диаграмм БП в виде больших текстовых блоков. Однако оформление его в таком виде, безусловно, способствует идентификации данных частей текста, организации по ним и в них автоматизированного поиска и пр. Наиболее часто текст АР формализуем в виде объектов пп. 2, 6, 7, 9, 12 (см. табл. 1), которых достаточно для формирования 50 % диаграмм.



Таким образом, входные данные для проектируемой «FORMS» должны быть представлены в виде русскоязычного текста (если на вход системы поступает НПА или АР) и диаграмм в нотациях DFD и IDEF3 (если на вход системы поступает диаграмма из СЭУ).

Наиболее многофункциональными CASE-системами, поддерживающими DFD и IDEF3, с широкими возможностями интеграции являются системы CA ERwin Process Modeler (ранее BPWin) и Business Studio. Более простая по функционалу система, но также подходящая для первоначальной формализации, – MS Visio.

Заключение

В статье проиллюстрирована актуальность и возможность решения проблем, возникающих на стадиях «формирование требований» и «проектирование» ЖЦ ЭП посредством создания системы «FORMS», взаимодействующей с CASE-системой, из которой происходит получение графических данных (диаграмм БП оказания МУ).

Помимо графических данных, проектируемая CASE-система получает на вход и анализирует текстовые данные – тексты НПА и АР. «FORMS» осуществляет оптимизацию БП оказания МУ на уровнях НПА, АР и диаграмм БП. Проектируемая система реализует функционал, ранее не развитый в CASE-системах, – связывает фрагменты текстов АР БП с графическими примитивами нотаций, в которых проводится моделирование БП оказания МУ, а также выполняет строковый анализ текстов НПА и АР БП с целью выявления необходимых изменений (трансформаций) в текстах АР (диаграммах БП оказания МУ).

Кроме того, рассмотрены особенности предварительной формализации БП: обоснован выбор нотаций для первоначальной формализации БП, подробно разобрана структура формализуемого текста АР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бердонос, В. Д. О классификации систем автоматизированного проектирования и создания программ (CASE) / В. Д. Бердонос, Е. В. Редколис // Ученые записки КнАГТУ. Науки о природе и технике – 2010. – № IV-1(4). – С. 12-25. ISSN 2076-4359.
2. Концепция формирования в Российской Федерации электронного Правительства до 2010 г. (в ред. Постановления Правительства РФ от 10.03.2009 № 219): одобрена распоряжением Правительства Российской Федерации № 632-р от 06.05.2008.
3. Правила размещения в федеральных государственных информационных системах «Сводный реестр государственных и муниципальных услуг (функций)» и «Единый портал государственных и муниципальных услуг (функций)» сведений о государственных и муниципальных услугах (функциях) : Постановление Правительства Российской Федерации (в ред. Постановления Правительства РФ от 16.06.2010 № 445) от 15.06.2009. №478.
4. Об организации предоставления государственных и муниципальных услуг : Федеральный закон (в ред. Федерального закона от 06.04.2011 № 65-ФЗ) от 27.07.2010 №210-ФЗ.
5. О порядке разработки и утверждения административных регламентов предоставления муниципальных услуг : распоряжение Администрации г. Комсомольска-на-Амуре от 15.11.2010 №500-ра.
6. Стандарты электронных услуг. Справочно-информационный портал [Электронный ресурс] / Требования к структуре, содержанию, оформлению и порядку разработки стандартов государственной (муниципальной) услуги, предоставляемой в электронном виде. Режим доступа: <http://egov-std.ru/>, свободный. – Загл. с экрана. Яз. рус.
7. Berdonosov, V.D. Structure functional analysis of the business processes / V.D. Berdonosov, E.V. Redkolis, Nikitin K.E. // 2nd Global TRIZ Conference 2011 in Korea proceedings. March 10(Thu.)-11(Fri.), 2011. Dasan Hall, The Korea Economic Daily, Seoul, Korea. – 2011. – P. 37.

Бахарева Е. А., Стружанов В. В.
E.A.Bahareva, V.V.Struzhanov

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА ЧИСТОГО ИЗГИБА БАЛКИ ИЗ УПРУГОХРУПКОГО МАТЕРИАЛА

STABILITY ENERGY CRITERION FOR PURE BENDING OF A BEAM MADE OF ELASTIC-BRITTLE MATERIAL

Бахарева Елена Александровна – аспирант Института машиноведения УрО РАН (Россия, Екатеринбург); 620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, д. 34. E-mail: bahareva.e.a@mail.ru.

Ms. Elena A. Bahareva – PhD Candidate, Institute of Engineering Science, the Urals Branch of Russian Academy of Sciences (620049, Yekaterinburg, Komsomolskaya st., 34). E-mail: bahareva.e.a@mail.ru.

Стружанов Валерий Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института машиноведения УрО РАН (Россия, Екатеринбург); 620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, д. 34; 8(343)37-53-594. E-mail: stru@imach.uran.ru.

Mr. Valeriy V. Struzhanov – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Chief Researcher, Institute of Engineering Science, the Urals Branch of Russian Academy of Sciences (Yekaterinburg). E-mail: stru@imach.uran.ru.

Аннотация. Разрушение механической системы есть потеря устойчивости процесса деформирования. Одной из возможных причин потери устойчивости механических систем является переход материала некоторых элементов системы на стадию деформационного разупрочнения, когда материал обладает внутренней неустойчивостью. Эта стадия, также называемая состоянием предразрушения, характеризуется существенным повреждением материала микротрещинами и микропорами и падением его несущей способности. Метод исследования устойчивости процесса чистого изгиба балки из пластичного материала, предложенный в работе [1], применен для исследования устойчивости балки из упругохрупкого материала.

Summary. The destruction of a mechanical system is a buckling deformation process. One of the possible causes of buckling deformation processes is the transition of the material of some elements of the system to a weakening stage. In this case the material is internally instable. This stage is also called pre-destruction and characterized by a significant damage of material by microcracks and micropores and a decrease of the load carrying capacity. The stability analysis technique of the pure bending process, which was suggested in [1], is used here to research the stability of a beam made of elastic-brittle material.

Ключевые слова: чистый изгиб, растяжение, полная диаграмма деформирования, напряжения, деформации, устойчивость, разрушение.

Key words: pure bending, tension, square beam, complete deformation curve, stress, strain, stability, destruction.

УДК 593.3

Постановка задачи. Рассмотрим балку прямоугольного поперечного сечения высотой $2h$ и длиной L , к концам которой прикладывается изгибающий момент M . Деформирование осуществляется квазистатически при постоянной температуре.

В задаче о чистом изгибе единственная ненулевая компонента тензора напряжений – продольное напряжение $\sigma_x = \sigma(y)$, а продольная деформация линейно распределена по высоте балки $\varepsilon_x = \varepsilon(y)$ (см. рис. 1). Считаем, что материал проявляет одинаковые свойства как при растяжении, так и при сжатии. Это обеспечивает неизменность нейтральной линии относительно оси симметрии. Тогда полные деформации вычисляются по формуле $\varepsilon = \kappa y$, где κ – кривизна.

Очевидно, что при любом распределении напряжений и деформаций по высоте балки дифференциальные уравнения равновесия и условия совместности удовлетворяются тождественно. Граничные условия, имеющие смысл статических уравнений равновесия, имеют вид [4]:

$$2b \int_0^h \sigma(y) dy = 0, \quad 2b \int_0^h \sigma(y) y dy = M.$$

Свойства материала характеризует полная диаграмма деформирования, обладающая восходящей и падающей до нуля ветвями. Четная функция $E^p(\varepsilon) = d\sigma/d\varepsilon$ касательного модуля определяет наклон диаграммы. Если $E^p > 0$, то имеет место упрочнение материала, при $E^p < 0$ – разупрочнение.

Исследуем балку, изготовленную из упругохрупкого материала, в котором при деформировании практически не возникают пластические деформации, и диссипация энергии происходит только за счет континуального разрушения. Параметрами термодинамического состояния будем считать упругую деформацию ε^e и параметр ω , характеризующий поврежденность материала. Разгрузка в материале происходит по секущему модулю $E^s = \sigma(\varepsilon)/\varepsilon$.

Для упругохрупкого материала соотношение, связывающее напряжения и деформации, принимает вид:

$$\sigma = E(1 - \omega)\varepsilon, \quad (1)$$

где E – модуль Юнга и $E(1 - \omega) = E^s$.

Отсюда поврежденность вычисляется по формуле

$$\omega = 1 - \frac{E^s}{E}. \quad (2)$$

Энергия деформаций [3]. Потенциальная энергия упругих деформаций для упругохрупкого материала определяется выражением $\Pi^e = \frac{1}{2} E(1 - \omega)\varepsilon^2 = \frac{1}{2} E^s \varepsilon^2$. Ее приращение равно

$$d\Pi^e = E(1 - \omega)\varepsilon d\varepsilon - \frac{1}{2} E\varepsilon^2 d\omega = E^s \varepsilon d\varepsilon - dg^\omega = \sigma d\varepsilon - dg^\omega. \quad (3)$$

Если $d\Pi^e > 0$, то подводимая энергия превышает диссипацию; если $d\Pi^e < 0$, то материал диссипирует всю подводимую энергию и ещё часть энергии, накопленной материалом.

В соотношении (3) $dg^\omega = \frac{1}{2} E\varepsilon^2 d\omega = \frac{1}{2} E(\varepsilon^e)^2 d\omega$ – диссипация континуального разрушения.

Рассмотрим выражение

$$d(\sigma\varepsilon) = \sigma d\varepsilon + \varepsilon d\sigma = \sigma d\varepsilon + \varepsilon E d[(1 - \omega)\varepsilon] = \sigma d\varepsilon + E\varepsilon(1 - \omega)d\varepsilon - \varepsilon E\varepsilon d\omega = 2\sigma d\varepsilon - 2dg^\omega. \quad (4)$$

Отсюда $dg^\omega = \frac{1}{2}(\sigma d\varepsilon - \varepsilon d\sigma)$. Сравнивая далее формулы (3) и (4), находим, что

$d\Pi^e = \frac{1}{2} d(\sigma\varepsilon)$. Далее, подставляя выражение для поврежденности (2) в формулу для потенциальной энергии, имеем

$$d\Pi^e = E^s \varepsilon d\varepsilon + \frac{1}{2} \varepsilon^2 dE^s = E^s \varepsilon d\varepsilon + \frac{1}{2} \varepsilon (E^p - E^s) d\varepsilon = \frac{1}{2} (E^p + E^s) \varepsilon d\varepsilon. \quad (5)$$

Здесь

$$\frac{dE^s}{d\varepsilon} = \frac{d}{d\varepsilon} \left(\frac{\sigma}{\varepsilon} \right) = \frac{1}{\varepsilon^2} \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \varepsilon - \sigma \right) = \frac{1}{\varepsilon} (E^p - E^s). \quad (6)$$

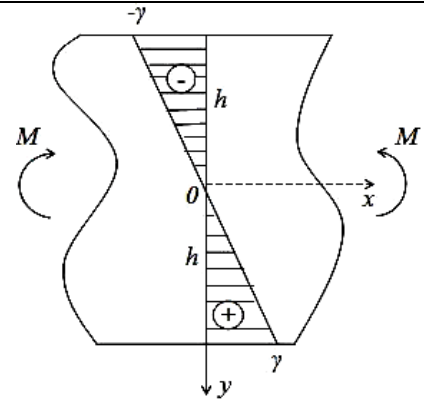


Рис. 1. Распределение продольных деформаций

Из выражения (5) следует, что $d\Pi^e > 0$, когда $E^p + E^s > 0$, и $d\Pi^e < 0$, когда $E^p + E^s < 0$. Отсюда диссипация начинает превышать подводимую энергию, если $E^p < -E^s$ ($E^s > 0$). Следовательно, после выхода на падающую ветвь диаграммы $\sigma(\varepsilon)$, несмотря на падение напряжения при росте деформации, упругохрупкий материал продолжает накапливать потенциальную энергию упругих деформаций.

Энергетический критерий устойчивости. Рассмотрим сначала физический элемент балки единичного объема. Для него выпишем энергетический функционал в виде приращения полной энергии механической системы на приращении деформаций

$$\rho = E^s (d\varepsilon)^2 - \frac{1}{2} E\varepsilon d\omega d\varepsilon. \quad (7)$$

Здесь первое слагаемое – потенциальная энергия приращения упругих деформаций и второе слагаемое – приращение энергии, потерянной из-за континуального разрушения (релаксация напряжений вследствие микроразрушений). Численно первое слагаемое равно площади всего выделенного треугольника (см. рис. 2). Второе же представляет собой площадь нижней (слабоокрашенной) области. Оно имеет смысл работы напряжений $d\sigma^\omega$, возникающих из-за появления микропор и микротрещин, на приращении деформаций $d\varepsilon$ (см. п. 2). Тогда разность (7) равна площади темного треугольника.

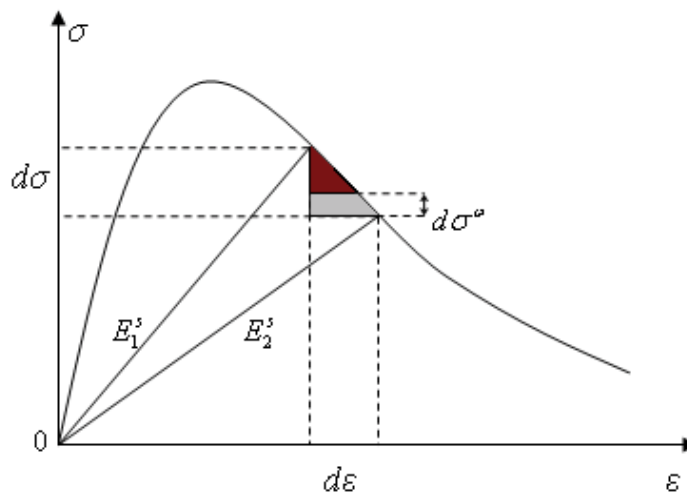


Рис. 2. Типичная диаграмма деформирования

Преобразуем (7), используя соотношения (1) и (2):

$$d\Pi = E[(1 - \omega)d\varepsilon - \varepsilon d\omega]d\varepsilon + \frac{1}{2} E\varepsilon d\omega d\varepsilon = d\sigma \cdot d\varepsilon + d\sigma^\omega d\varepsilon.$$

Здесь последнее слагаемое всегда положительное, так как $E > 0$ – модуль Юнга, поврежденность ω – монотонно возрастающая функция на промежутке $y \in [-h; h]$. Отсюда постулат Друккера [2] выполняется тогда, когда энергетический функционал $\rho > 0$. В противном случае $\rho < 0$. Отметим, что постулат Друккера можно рассматривать как определение устойчивого материала. Следовательно, если $\rho > 0$, то состояние материала физически устойчиво, если же $\rho < 0$, то физически неустойчиво.

Исследуем теперь устойчивость положения равновесия всей балки. Возмутим некоторое данное положение равновесия, приложив к торцам изгибающий момент $dM > 0$. Просуммируем по объёму балки функционалы (7). Получим так называемый R -интеграл

$$R = Lb \int_{-h}^h \rho dy = 2Lb \int_0^h [(1 - \omega)(d\varepsilon)^2 - \varepsilon d\omega d\varepsilon] dy + \frac{1}{2} Lb E \kappa d\kappa \int_{-h}^h (d\omega y^2) dy =$$

$$\begin{aligned} &= 2Lb \int_0^h (d\sigma d\varepsilon) dy - Lb \kappa d\kappa \int_0^h (dE^p y^2) dy = 2Lb \int_0^h E^p (d\varepsilon)^2 dy - Lb (d\kappa)^2 \int_0^h E^p y^2 dy + \\ &+ Lb \frac{(d\kappa)^2}{\kappa} \int_0^h \sigma(y) y dy = (d\kappa)^2 \left[Lb \int_0^h E^p y^2 dy + \frac{LM}{2\kappa} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

Кривизну $d\kappa$ определим из второго граничного условия, записанного для возмущенного положения равновесия

$$dM = 2b \int_0^h d\sigma y dy.$$

Учитывая соотношение для касательного модуля и формулу $\varepsilon = \kappa y$, преобразуем это соотношение и выразим $d\kappa$. Имеем

$$d\kappa = \frac{dM}{2b \int_0^h E^p y^2 dy}. \quad (9)$$

Далее подставляем (8) в (9) и находим

$$R = \frac{(dM)^2}{\left(2b \int_0^h E^p y^2 dy \right)^2} \left[Lb \int_0^h E^p y^2 dy - \frac{ML}{2\kappa} \right]. \quad (10)$$

Тогда по аналогии с устойчивостью материального элемента, если $R > 0$, то положение равновесия устойчиво, если $R < 0$ или $R = \infty$ – неустойчиво, и система должна перейти в устойчивое состояние, если оно существует. Причем этот скачок будет сопровождаться сбросом энергии.

Таким образом, при постепенном увеличении нагрузки сначала материал упрочняется ($E^p > 0$), $R > 0$ и из-за появления микропор в балке диссипирует только часть энергии, подведенной при догрузении. После достижения некоторой критической нагрузки начинает диссипировать не только вся подведенная энергия, но и часть упругой энергии, накопленной в балке до ее догружения. В этот момент процесс деформирования теряет устойчивость и интеграл $R = \infty$. Далее следует разрушение балки. Из (10) видно, что условие возможно только, если интеграл

$$2b \int_0^h E^p y^2 dy = 0.$$

Полученное условие устойчивости позволяет определить предельную несущую способность балки [1].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 10-08-00135).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бахарева, Е. А. Энергетический критерий устойчивости процесса чистого изгиба балки из пластичного материала / Е. А. Бахарева, В. В. Стружанов // Проблемы оптимального проектирования сооружений: доклады 2-й Всерос. конф. – Новосибирск: Новосиб. гос. архит.-строит. ун-т (Сибстрин). – 2011. – С. 53-59.
2. Качанов, Л. М. Основы теории пластичности / Л. М. Качанов. – М.: Наука, 1969. – 420 с.
3. Стружанов, В. В. Свойства разупрочняющихся материалов и определяющие соотношения при одноосном напряженном состоянии / В. В. Стружанов // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: физ.-мат. науки. – 2007. – № 2 (15). – С. 69-78.
4. Тимошенко, С. П. Механика материалов / С. П. Тимошенко, Дж. Гере. – М.: Мир, 1976. – 669 с.

Полуян Л.В., Тимашев С.А.

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ И ВЕРОЯТНОСТИ ОТКАЗОВ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ,
ДЕГРАДИРУЮЩИХ ВО ВРЕМЕНИ

Полуян Л. В., Тимашев С. А.

L.V.Poluyan, S.A.Timashev

**ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ И ВЕРОЯТНОСТИ ОТКАЗОВ ТОНКОСТЕННЫХ
ТРУБОПРОВОДОВ, ДЕГРАДИРУЮЩИХ ВО ВРЕМЕНИ**

**ESTIMATION OF RELIABILITY AND FAULT PROBABILITY FOR THIN-WALLED
PIPELINES DEGRADING IN TIME**

Полуян Людмила Владимировна – кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе Научно-инженерного центра «Надежность и ресурс больших систем и машин» Уральского отделения РАН (Россия, Екатеринбург). E-mail: sec@wekt.ru.

Ms. Ludmila V. Poluyan – PhD in Engineering, Deputy Director for Research, the Science and Engineering Center «Reliability and Safety of Large Systems and Machines», the Urals Branch, Russian Academy of Sciences.

Тимашев Святослав Анатольевич – доктор технических наук, профессор, директор Научно-инженерного центра «Надежность и ресурс больших систем и машин» Уральского отделения РАН (Россия, Екатеринбург). E-mail: sec@wekt.ru.

Mr. Svyatoslav A. Timashev – **Doctor of Engineering, Professor**, Director, the Science and Engineering Center «Reliability and Safety of Large Systems and Machines», the Urals Branch, Russian Academy of Sciences.

Аннотация. Предложен метод оценки надежности поперечного сечения трубопровода с единичным коррозионным дефектом произвольных размеров. Он основан на разложении функции надежности в ряд Грама-Шарлье-Эджворта. Используются два критерия потери целостности трубопроводной системы – течь и разрыв. Функции предельного состояния включают шесть параметров, являющихся случайными величинами. Остаточная прочность трубопровода оценивается с использованием норм ANSI/ASME B31G and B31G модифицированной.

Summary. A method is suggested for assessing reliability of pipeline cross sections with a growing corrosion defect of arbitrary size. The method is based on decomposing the reliability function using the Gram-Charlier-Edgeworth series. Two criteria for integrity failure of a pipeline system are considered – leak and rupture. The limit state functions are comprised of six parameters which are considered random variables. The residual strength of the pipeline is assessed using the ANSI/ASME B31G and the modified B31G design codes.

Ключевые слова: трубопроводная система, остаточная прочность трубопровода, оценка надежности, отказ, коррозионный дефект, функция предельного состояния, ряд Грама-Шарлье-Эджворта, метод Монте-Карло.

Key words: pipeline systems, residual durability of a pipeline, reliability estimation, failure, corrosion defect, limit state function, Gram-Charlier-Edgeworth series, Monte Carlo simulation method.

УДК 621.643.539

Постановка задачи. Имеется информация о фактических реализациях процессов (для давления и глубины дефекта) на ограниченном интервале эксплуатации трубопровода. Известны исходные данные: глубина d и длина l дефекта; толщина стенки t и диаметр D трубопровода; предел текучести материала σ_y ; радиальная v_{rc} и аксиальная v_{ac} скорости коррозии; рабочее давление P_{op} . Эти параметры являются случайными величинами (СВ), причем все они, кроме σ_y , функции времени. Требуется оценить надежность трубопровода, то есть

найти вероятность его безотказной работы в течение определенного времени. Под отказом (пределным состоянием) понимается потеря целостности трубопроводной системы из-за разрыва в результате выброса внутреннего давления как случайной величины за допустимый уровень и превышения глубиной коррозии дефекта заданного предельного значения.

В предлагаемом комплексном методе оценки надежности деградирующих трубопроводов используются:

- два критерия потери целостности (течь, разрыв) трубопроводной системы: вследствие выброса внутреннего давления как стационарного случайного процесса (или случайной величины) за допустимый уровень и превышения глубиной коррозии (дефекта) заданного предельного значения;

- независимые методы оценки надежности элементов трубопроводов (с использованием разложений функции распределения в ряд Грама-Шарлье-Эджворта (ГШЭ) [1; 2], моделирование реализаций методом Монте-Карло (МК));

- соответствующие законы распределения оценок статистических свойств материала, конструкций трубы и характеристик нагрузок;

- условия прочности трубопровода оцениваются по методикам ANSI/ASME базовой B31G и B31G модифицированной [4] (далее соответственно – B31G и B31G mod.).

Оценка надежности трубопроводов при одновременном учете нескольких критериев отказов.

Условия прочности по B31G. Согласно B31G, предельное давление разрушения трубы в зависимости от формы дефекта имеет вид:

$$\begin{cases} P_f^{(1)} = 1.11 \frac{2\sigma_y t}{D} \left(\frac{1 - \frac{2d(T)}{3t}}{1 - \frac{2d(T)}{3t} M^{-1}} \right) & \text{для } \frac{l(T)^2}{Dt} \leq 20, \\ P_f^{(1)} = 1.11 \frac{2\sigma_y t}{D} \left(1 - \frac{d(T)}{t} \right) & \text{для } \frac{l(T)^2}{Dt} > 20, \end{cases} \quad (1)$$

где

$$M = \sqrt{1 + 0.893 \frac{l(T)^2}{Dt}},$$

$P_f^{(j)}$ – предельное давление разрушения трубы; $j = 1, 2$ – номер методики; σ_y – предел текучести материала трубы; t – толщина стенки; D – диаметр трубы; T – время эксплуатации, $d(T)$, $l(T)$ – глубина и длина дефекта в момент T ; M – фактор Фолиаса. Первое выражение в (1) представляет предельное давление разрушения трубы с дефектом параболической формы, а второе – прямоугольной и используется при протяженной коррозии (за пределами применения первого уравнения), так как в этом случае приближение параболической формой не подходит.

Условия прочности по B31G mod. Для этой методики имеем:

$$P_f^{(2)} = \frac{2(\sigma_y + 68.95 \text{ МПа})t}{D} \left(\frac{1 - 0.85 \frac{d(T)}{t}}{1 - 0.85 \frac{d(T)}{t} M^{-1}} \right), \quad (2)$$

где

$$\begin{cases} M = \sqrt{1 + \frac{1.255 l(T)^2}{2 Dt} - \frac{0.0135 l(T)^4}{4 D^2 t^2}} & \text{для } \frac{l(T)^2}{Dt} \leq 50, \\ M = 0.032 \frac{l(T)^2}{Dt} + 3.3 & \text{для } \frac{l(T)^2}{Dt} > 50. \end{cases}$$

Модификации заключаются в изменении определения предела текучести, Фолиас-фактора, а предположение о параболической форме дефекта заменено введением коэффициента коррекции произвольной формы, взятого равным 0,85. Для оценки коррозионных дефектов критерий B31G mod. более предпочтителен.

Решение задачи оценки надежности. Для решения задачи оценки надежности произвольного сечения трубы в текущий момент времени T при заданных условиях прочности используется разложение функции надежности в ряд ГШЭ [1; 2]. Вводятся обозначения параметров, входящих в условия прочности и рабочего давления, являющихся СВ: $x_i, i = 1, \dots, 6$, где $x_1 = t, x_2 = D, x_3 = l_0, x_4 = d_0, x_5 = \sigma_y, x_6 = P_{op}$. Рассматриваются следующие условия прочности для единичного сечения трубопровода:

$$\begin{aligned} P_f^{(j)}(t, D, l_0, d_0, \sigma_y, \sigma_u, d(T), l(T)) &> P_{op}, \quad j = 1, \dots, 5; \\ t &> d(T) \end{aligned}$$

где $P_f^{(j)}$ оценивается по нормам B31G и B31G mod. [4].

Функция предельного состояния (ФПС) единичного поперечного сечения трубопровода в соответствии с заданными условиями прочности имеет вид:

$$Y^{(j)} = Y^{(j)}(x_1, \dots, x_6, T) = \begin{cases} P_f^{(j)}(x_1, \dots, x_5) - P_{op}, & (j = 1, 2) \\ kx_1 - d(T) \end{cases}, \quad (3)$$

где k – параметр, имеющий смысл предупреждающего (тревожного) отказа. Функция распределения $Y^{(j)}$ представлена рядом ГШЭ:

$$P^{(j)}(z_j) = \Phi(z_j) - \frac{S}{3!} \varphi^{(2)}(z_j) + \frac{E}{4!} \varphi^{(3)}(z_j) + \frac{10S^2}{6!} \varphi^{(5)}(z_j), \quad (4)$$

где

$$\varphi(z) = \Phi'(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{z^2}{2}\right]. \quad (5)$$

Функции $\Phi(z_j), \varphi^{(2)}(z_j), \varphi^{(3)}(z_j)$ определяются в зависимости от параметра

$$z_j = \frac{Y^j - m_{Y^{(j)}}(T)}{\sigma_{Y^{(j)}}(T)}. \quad (6)$$

Функции $\varphi^{(2)}(z_j), \varphi^{(3)}(z_j)$ определяются как

$$\varphi^{(2)}(z) = (z^2 - 1)\varphi(z), \quad \varphi^{(3)}(z) = (3z - z^3)\varphi(z), \quad \text{где } \varphi'(z) = -z\varphi(z). \quad (7)$$

Математическое ожидание СВ в текущий момент времени T :

$$m_{Y^{(j)}}(T) = Y^{(j)}(x_1 = m_{x_1}, x_2 = m_{x_2}, \dots, x_6 = m_{x_6}; T). \quad (8)$$

Среднеквадратическое отклонение для СВ $Y^{(j)}$:

$$\sigma_{Y^{(j)}}(T) = \sqrt{\mu_{2Y^{(j)}}(T)}. \quad (9)$$

Асимметрия закона распределения СВ $Y^{(j)}$:

$$S = \frac{\mu_{3Y^{(j)}}(T)}{\sigma_{Y^{(j)}}^3(T)}. \quad (10)$$

Экссесс закона распределения СВ $Y^{(j)}$:

$$E = \left(\frac{\mu_{4Y^{(j)}}(T)}{\sigma_{Y^{(j)}}^4(T)} - 3 \right). \quad (11)$$

Центральные моменты 2, 3 и 4-го порядка для СВ $Y^{(j)}$ в формулах (9) – (11), полученные с использованием линеаризации функций $Y^{(j)}$, имеют соответственно вид:

$$\mu_{2Y^{(j)}}(T) = \sum_{i=1}^6 \left[\left(\frac{\partial Y^{(j)}}{\partial x_i} \right)^2 \Big|_{m_{x_1}, \dots, m_{x_6}} \cdot \mu_{2x_i}(T) \right], \quad (12)$$

$$\mu_{3Y^{(j)}}(T) = \sum_{i=1}^6 \left[\left(\frac{\partial Y^{(j)}}{\partial x_i} \right)^3 \Big|_{m_{x_1}, \dots, m_{x_6}} \cdot \mu_{3x_i}(T) \right], \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \mu_{4Y^{(j)}}(T) = & \sum_{i=1}^6 \left[\left(\frac{\partial Y^{(j)}}{\partial x_i} \right)^4 \Big|_{m_{x_1}, \dots, m_{x_6}} \cdot \mu_{4x_i}(T) \right] + \\ & + 6 \sum_{\substack{i,k=1 \\ i < k}}^6 \left[\left(\frac{\partial Y^{(j)}}{\partial x_i} \right)^2 \Big|_{m_{x_1}, \dots, m_{x_6}} \cdot \left(\frac{\partial Y^{(j)}}{\partial x_k} \right)^2 \Big|_{m_{x_1}, \dots, m_{x_6}} \cdot \mu_{2x_i}(T) \mu_{2x_k}(T) \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Ряд (4) позволяет в произвольный момент времени T эксплуатации трубы определить численное значение показателя надежности для единичного поперечного сечения трубопровода с дефектом произвольных размеров при заданной функции предельного состояния (3).

Надежность i -го элемента трубопровода при двух типах отказов по критериям течи и разрыва рассчитывается по формуле

$$R^d_i(T) = 1 - P_f^{(j)}(T) = 1 - [P_f^b(T, d) + P_f^l(T, d) - P_f^b(T, d)P_f^l(T, d)], \quad (15)$$

где $P_f^{(j)}(T)$ – вероятность отказа произвольного поперечного сечения трубопровода с дефектом определяемая как

$$P[Y^{(j)}(T) = 0] = P \begin{cases} P_f^{(j)}(T) - P_{op}(T) = 0; & 0 \leq T \leq T^* \\ kt - d(T) = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Вероятности отказа из-за разрыва $P_f^b(d, T)$ и течи $P_f^l(d, T)$ находятся соответственно по формулам

$$P_f^b(d, T) = \int_{\Omega} f(P_{op}, P_f^d) dP_{op} dP_f^d, \quad P_f^l(d, T) = \int_{kt}^{\infty} f(x) dx, \quad (17)$$

где $f(P_{op}, P_f^d)$ – совместная плотность распределения вероятности двух СВ – рабочего давления и давления разрыва сечения трубы с дефектом случайного размера; $f(x)$ – функция распределения плотности вероятности (ФПВ) глубины дефекта; Ω – область интегрирования.

Проверка адекватности метода ГШЭ проведена методом МК с моделированием реализаций роста параметров дефекта при активной коррозии, изменяющихся во времени случайным образом и представляемых алгебраическими уравнениями [3]:

$$\begin{aligned} d(T) &= d_0 + v_{rc} \cdot (T - T_0) \\ l(T) &= l_0 + v_{ac} \cdot (T - T_0), \end{aligned} \quad (18)$$

где T_0 – время инспекции/диагностики; d_0 , l_0 – начальные глубина и длина дефектов; v_{rc} , v_{ac} – соответственно детерминированные или случайные радиальная и продольно-осевая скорости коррозии. ФПВ величин $d(T)$ и $l(T)$ находятся по ФПВ, входящим в (4).

Алгоритм оценки надежности поперечного сечения трубопровода с использованием разложения в ряд Грама-Шарлье-Эджворта.

Согласно норме В31G, имеем $P_f^{(1)}(T) = P_f^{(1)}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, T)$:

$$P_f^{(1)}(T) = \begin{cases} \frac{2,22x_1 \cdot x_5}{x_2} \cdot \frac{1 - \frac{2d(T)}{3x_1}}{1 - \frac{2d(T)}{3x_1 M_1}}, \text{ для } G < 4, \\ \frac{2,22x_1 \cdot x_5}{x_2} \cdot \left(1 - \frac{d(T)}{x_1}\right), \text{ для } G \geq 4, \end{cases} \quad (19)$$

где

$$d(T) = x_4 + v_{rc}(T - T_0), \quad l(T) = x_3 + v_{ac}(T - T_0), \quad G = \frac{0,893 \cdot l(T)}{\sqrt{x_1 \cdot x_2}},$$

где v_{rc} и v_{ac} – радиальная и продольно-осевая скорости коррозии соответственно;

$$M_1 = \sqrt{1 + \frac{0,893 \cdot l^2(T)}{x_1 \cdot x_2}}.$$

По норме В31G mod. – $P_f^{(2)}(T) = P_f^{(2)}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, T)$:

$$P_f^{(2)}(T) = \frac{2(x_5 + 68,95 \text{ МПа}) \cdot x_1}{x_2} \cdot \frac{1 - \frac{0,85 \cdot d(T)}{x_1}}{1 - \frac{0,85 \cdot d(T)}{x_1 M_2^{-1}}}, \text{ для } G < 4, \quad (20)$$

где

$$M_2 = \begin{cases} \sqrt{1 + \frac{0,6275 \cdot l^2(T)}{x_1 \cdot x_2} - \frac{0,003375 \cdot l^4(T)}{x_1^2 \cdot x_2^2}}, \text{ для } \frac{l^2(T)}{x_1 \cdot x_2} \leq 50, \\ \frac{0,032 \cdot l^2(T)}{x_1 \cdot x_2} + 3,3, \text{ для } \frac{l^2(T)}{x_1 \cdot x_2} > 50. \end{cases}$$

Приближенная оценка надежности трубопровода проводится с использованием разложения плотности вероятности в ряд ГШЭ. Для вычисления центральных моментов 2, 3 и 4-го порядка для СВ $Y^{(j)}$ в формулах (9) – (11) определяются частные производные $\frac{\partial Y^{(j)}}{\partial x_i}$

для ФПС $Y^{(j)}$, $j = 1, 2$.



Пример. Оценка надежности поперечного сечения трубы с одним дефектом по методам МК и ГШЭ. Исходные данные приведены в табл. 1 – 2.

Таблица 1

Исходные данные для детерминированных величин

| Обозначение, размерность | Значение |
|--------------------------|----------|
| T_0 , годы | 0 |
| v_{rc} , м/год | 0.0006 |
| v_{ac} , м/год | 0.0005 |
| T , годы | 0 – 10 |

Таблица 2

Исходные данные для СВ

| Обозначение, размерность | Матожидание, μ | Коэффициент вариации, $V = \sigma / \mu$ |
|--------------------------|--------------------|--|
| t , м | 0.021 | 0.02 |
| D , м | 0.900 | 0.02 |
| l_0 , м | 0.200 | 0.02 |
| d_0 , м | $0.4 t$ | 0.02 |
| σ_y , МПа | 358 | 0.07 |
| P_{op} , МПа | 7.8 | 0.1 |

Обозначения в подрисуночных названиях: POF (probability of failure) – вероятность отказа; P_{op} – рабочее давление; V – коэффициент вариации. Для детерминированных исходных параметров при начальной глубине $d_0 = 0,5 t$ и длине $l_0 = 200$ мм дефекта получены зависимости давления отказа $P_f^{(j)}$ ($j=1,2$) от безразмерных параметров – глубины d/t (см. рис. 1) и длины $l/(Dt)^{1/2}$ (см. рис. 2). Занумеруем нормы прочности: 1 – B31G, 2 – B31G mod. (на графиках результаты расчетов по этим нормам соответствуют кривым 1 и 2).

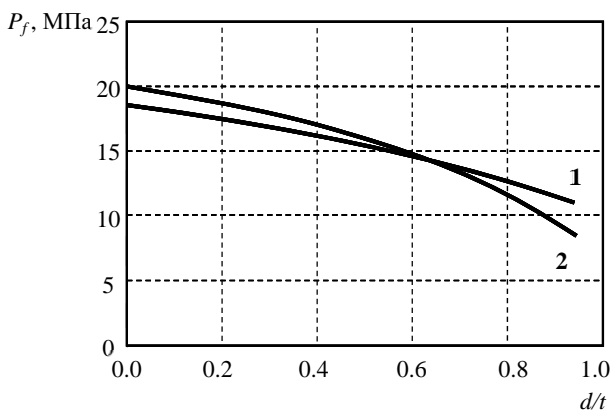


Рис. 1. Давление отказа как функция безразмерной глубины дефекта

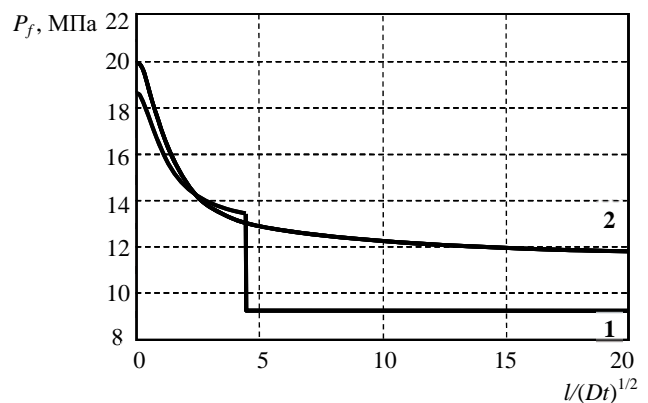


Рис. 2. Давление отказа как функция безразмерной длины дефекта

Результаты оценки надежности по ГШЭ и МК методам, когда все СВ распределены нормально, приведены на рис. 3 – 5. Видно, что при $T > 21$ года глубина дефекта больше,

чем толщина стенки трубы ($t - d(T) < 0$). Время достижения второго предельного состояния составляет $T_i = 14$ лет.

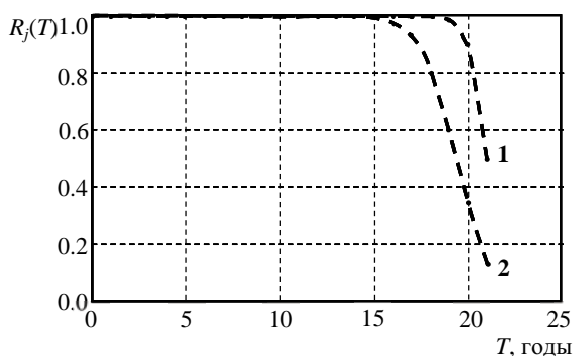


Рис. 3. Оценка надежности как функция времени эксплуатации трубы (МК метод)

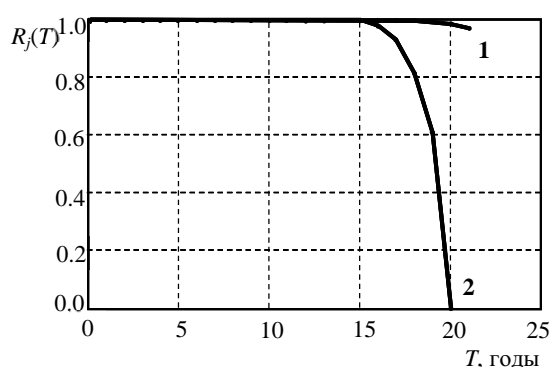


Рис. 4. Оценка надежности как функция времени эксплуатации трубы (ГШЭ метод)

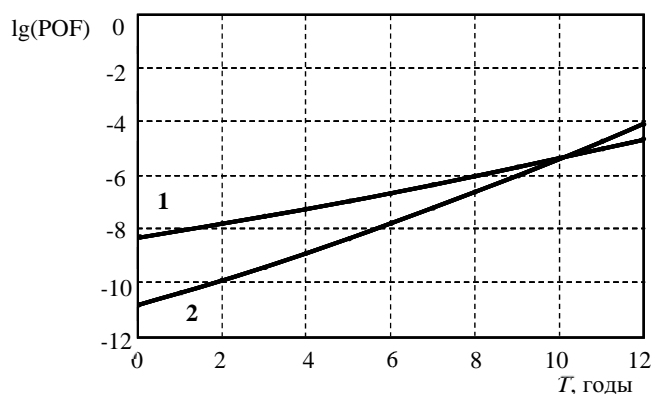


Рис. 5. $\lg(\text{POF})$ как функция времени эксплуатации трубы (ГШЭ метод)

Далее при оценке надежности трубопровода рассмотрена норма V31G mod. При проверке метода ГШЭ вычисления производились и для случая, когда все СВ распределены нормально, за исключением P_{op} , распределенного логнормально, при $V = 0.2$. Результаты расчета показаны на рис. 6 – 7.

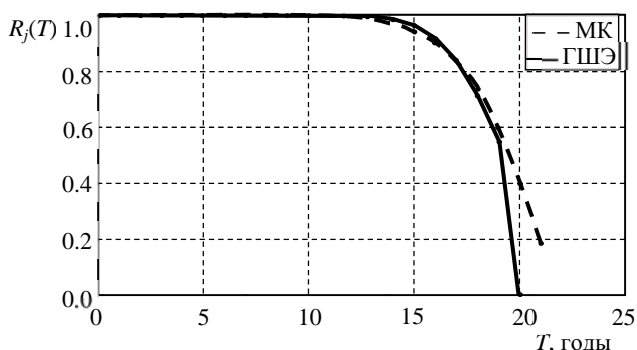


Рис. 6. Надежность как функция времени эксплуатации трубы (МК и ГШЭ метод)

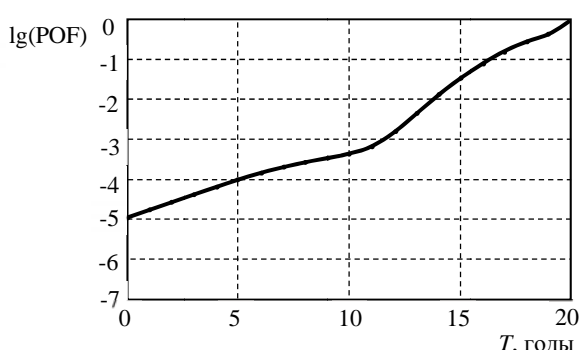


Рис. 7. $\lg(\text{POF})$ как функция времени эксплуатации трубы (ГШЭ метод)

Оба метода дают близкие результаты независимо от используемой нормы прочности. Отклонение начинается на уровне надежности ниже 0.5, не представляющем интерес для рассматриваемых задач. Результаты расчета приведены на рис. 8 – 9. На рис. 10 показано влияние распределения ФПВ P_{op} на вероятность отказа $POF(V)$, где V является аргументом.

Вычисления функции надежности $R(V)$ и вероятности отказа $POF(V)$ выполнены для детерминированного случая и логнормального распределения (при $\mu/\sigma = 0.2$). Результаты вычислений показаны на рис. 8 – 11.

Расчеты выполнены программистом А.В. Бушинской.

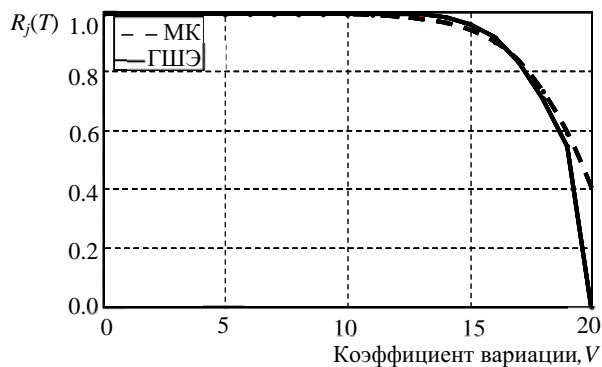


Рис. 8. Надежность как функция времени эксплуатации трубы;
 P_{op} распределено логнормально
(ГШЭ и МК методы)

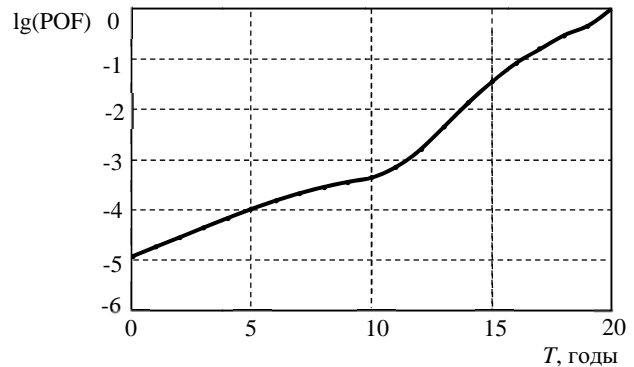


Рис. 9. $\log(POF)$ как функция времени эксплуатации трубы;
 P_{op} распределено логнормально
(ГШЭ и МК методы)

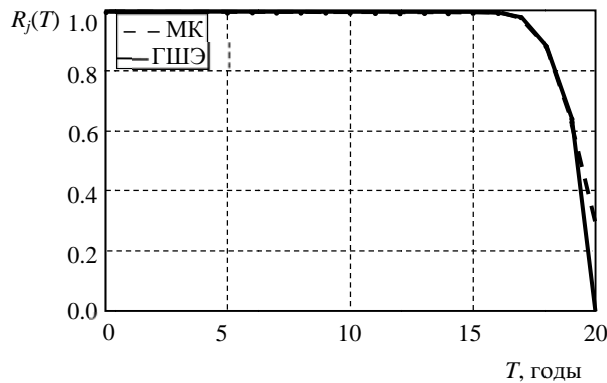


Рис. 10. Надежность как функция времени эксплуатации трубы;
 P_{op} – детерминированная величина
(ГШЭ и МК методы)

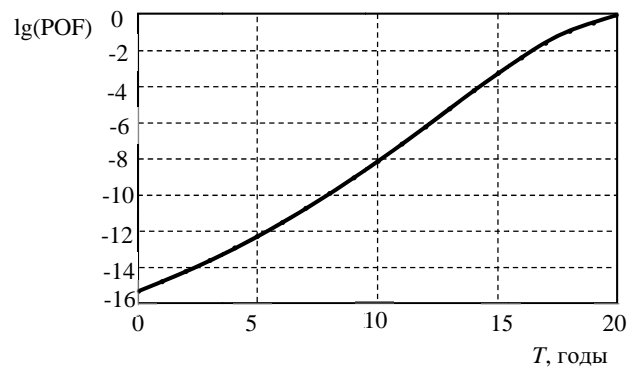


Рис. 11. $\log(POF)$ как функция времени эксплуатации трубы;
 P_{op} – детерминированная величина
(ГШЭ и МК методы)

Выводы. Разработан метод оценки надежности для поперечного сечения трубопровода с единичным дефектом произвольных размеров, основанный на использовании разложения ФПС в ряд ГШЭ. Он позволяет давать двустороннюю оценку надежности деградирующих трубопроводов. При этом используется два критерия потери целостности (разрыв и

Полуян Л.В., Тимашев С.А.

**ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ И ВЕРОЯТНОСТИ ОТКАЗОВ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ,
ДЕГРАДИРУЮЩИХ ВО ВРЕМЕНИ**

течь): вследствие превышения глубиной коррозии (дефекта) заданного предельного значения толщины стенки трубы и выброса внутреннего давления за допустимый уровень. Условия прочности оцениваются по методикам ANSI/ASME B31G (базовой) и B31G модифицированной.

Анализ расчетов показал, что:

- надежность трубопровода весьма чувствительна к толщине стенки трубы и глубине дефекта; почти не чувствительна к длине дефекта;
- размеры небольшого числа коррозионных дефектов сильно действуют на надежность соответствующего участка трубопровода, причем эта зависимость разная для мелких и глубоких дефектов;
- вероятностное распределение давления существенно влияет на изменение надежности трубы со временем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крамер, Г. Математические методы статистики [Текст] / Г. Крамер. – М.: Мир, 1975. – 648 с.
2. Пугачев, В. С. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст] / В. С. Пугачев. – М.: Наука, 1979. – 496 с.
3. Ahammed, M. Probabilistic estimation of remaining life of a pipeline in the presence of active corrosion defects [Text] / M. Ahammed // Int. J. Pres Ves Piping. – 1998. – № 75. – p.p. 321-329.
4. ASME-B31G. Manual for determining the remaining strength of corroded pipelines, A supplement to ASME B31G code for pressure piping // New York: American Society for Mechanical Engineers. – 1991.

Сергеева А. М., Ткачева А. В., Одинокое В. И.
A.M.Sergeeva, A.V.Tkacheva, V.I.Odinokov

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ЛЕДОКОЛЬНЫМ СУДНОМ

BULDING A MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS OF DEFORMATION OF ICE COVER BY AN ICEBREAKININ VESSEL



Сергеева Анастасия Михайловна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681005, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1. E-mail: serg-nasty@mail.ru

Ms. Anastasiya M. Sergeeva – PhD of Physics and Mathematics, Senior Research Fellow, Institute for Machine Engineering and Metallurgy of the Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: serg-nasty@mail.ru



Ткачева Анастасия Валерьевна – аспирант Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681005, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1. E-mail: 4nansi4@mail.ru

Ms. Anastasiya V. Tkacheva - PhD Candidate, Institute for Machine Engineering and Metallurgy of the Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: 4nansi4@mail.ru



Одинокое Валерий Иванович – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, директор Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681005, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1. E-mail: mail@imim.ru

Mr.Valery I. Odinkov - Doctor of Engineering, Professor, Meritorious Scientist of the Russian Federation, Director of the Institute for Machine Engineering and Metallurgy of the Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mail@imim.ru

Аннотация. С использованием теории малых упругих деформаций и определенного численного метода строится математическая модель устройства, прокладывающего судоходный канал. В работе решается пространственная задача о деформировании ледяного покрова различной толщины ледокольным судном.

Summary. Applying the theory of small elastic deformations and a numerical method, a mathematical model of the device laying a ship canal is built. The paper provides a solution to a spatial problem of deformation of ice cover of varying thickness by an icebreaking vessel.

Ключевые слова: математическое моделирование, численные методы, напряженно-деформированное состояние ледяного покрова.

Key words: mathematic modeling, numerical methods, stress-strain state of the ice cover.

УДК 539.3

Работа выполнена при поддержке РФФИ 11-01-98500-р_восток_a

Введение

С освоением северных регионов нашей страны экономически выгодным стало использование в качестве транспортных артерий крупных рек, таких, как Лена, Обь, Амур. Весной и осенью ледяной покров достаточно хрупок для передвижения по нему наземного вида транспорта, поэтому рационально использовать устройства, прокладывающие судоходные каналы. Одно из таких ледоразрушающих устройств описано в данной работе.

Работа направлена на построение математической модели процесса деформирования пресноводного ледяного покрова ледоразрушающим устройством, защищенным патентом РФ [6]. Целью работы является анализ напряженно-деформированного состояния (НДС), возникающего в ледяном покрове при воздействии на него ледокольным судном.

Описание устройства

Схема рассматриваемого устройства представлена на рис. 1. Ледоразрушающее устройство имеет надводную и подводную части. Надводная часть 1 включает в себя систему управления, приводы и пассажирский салон. Подводная часть 2 содержит отсеки для воздуха, топлива и двигателя судна. Система коммуникаций и гидропривод перемещений подводной части относительно надводной находятся в боковой части 3 ледоразрушающего устройства. Клинья 4 расположены по обе стороны от надводной части судна и предназначены для внедрения в ледяной покров, увеличивая тем самым ледоразрушающую способность устройства. Предполагается, что судно разгоняется на чистой воде до необходимой скорости и приближается к кромке неподвижного льда с постоянной скоростью. Подводная часть судна первой начинает контактировать со льдом, заходит под ледяной покров и скользит по нижней поверхности льда. Предполагается, что поверхность льда, контактирующая с водой, гладкая твердая, не способствует смерзанию составляющих судна со льдом и не создает препятствий для продвижения ледокола с постоянной заданной скоростью.

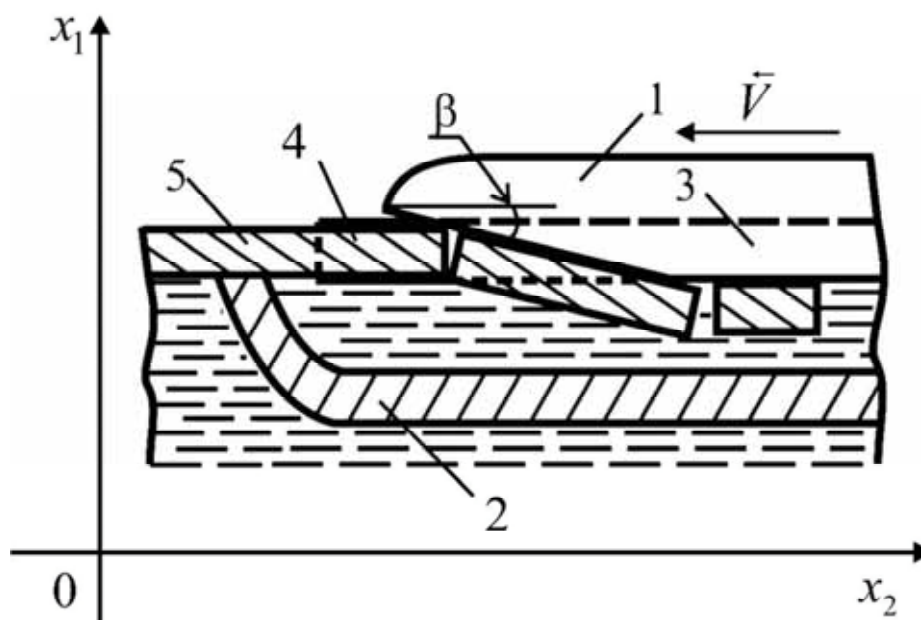


Рис. 1. Схема ледоразрушающего устройства: сечение плоскостью симметрии Ox_1x_2 , проходящей вдоль судна

В зависимости от толщины льда расстояние между надводной и подводной частями судна устанавливается еще до начала движения судна при помощи гидроцилиндров и воздушных секций подводной части ледоразрушающего устройства. При движении судна вперед боковые клинья 4 врезаются в лед, создавая дополнительную нагрузку на ледяной по-

кров. На рис. 1 изображено, что надводная часть судна находится под углом β относительно ледяного покрова. При движении ледоразрушающее устройство напоздает на лед δ и подми- нает его под себя. Обломки льда продвигаются между надводной и подводной частями устройства при помощи системы фрез, установленных по всей нижней части надводной со- ставляющей ледоразрушающего устройства. Таким образом, устройство обеспечивает себе безопасное продвижение в ледяном поле и создает судоходный канал.

Для построения математической модели рассмотрим $1/2$ области льда и $1/2$ носовой части ледокольного судна, поскольку ледоразрушающее устройство симметрично относи- тельно плоскости Ox_1x_2 , проходящей вдоль судна. На рис. 2 представлена формализованная схема нагружения ледяного покрова, находящегося под воздействием нагрузок, создаваемых ледоразрушающим устройством.

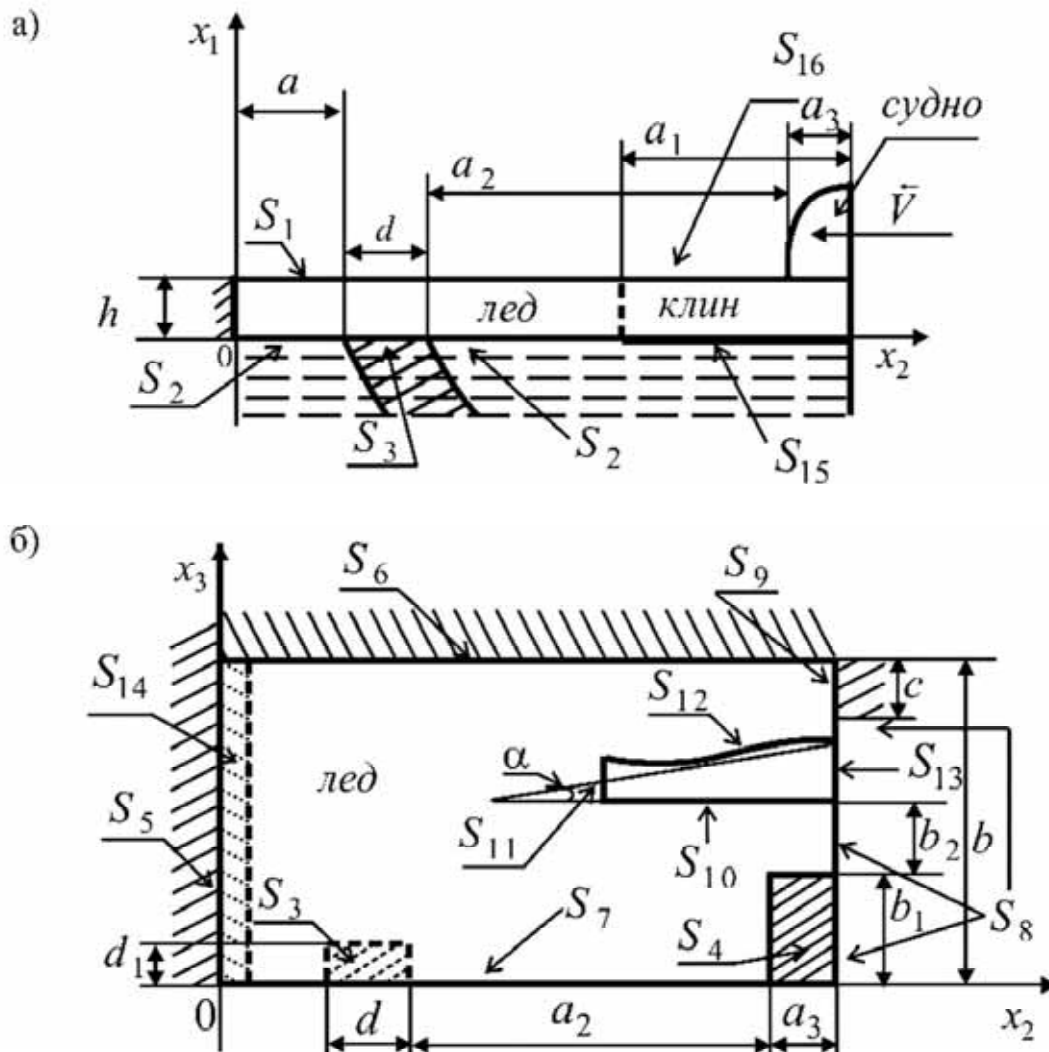


Рис. 2. Формализованная схема воздействия ледоразрушающего устройства на лед: а – в плоскости Ox_1x_2 , б – в плоскости Ox_2x_3

В плоскости, находящейся на расстоянии h (h – толщина ледяного покрова) от плоско- сти Ox_2x_3 , выделим три области: S_1 и S_4 , S_{16} , где S_1 – поверхность взаимодействия льда с атмосферой, S_4 – площадка контакта форштевня с льдом, S_{16} – область взаимодействия клина с атмосферой. В плоскости Ox_2x_3 определим четыре области – S_2 , S_3 , S_{14} , S_{15} (рис. 2, а, б).

Площадка S_2 характеризует взаимодействие льда с несжимаемой жидкостью – водой. Участки льда S_3 и S_{14} моделируют соответственно взаимодействие подводной части судна с нижней поверхностью льда и неподвижность льда в направлении оси Ox_1 , т. е. $v_1|_{S_{14}} = 0$. Участок нижней поверхности льда, ограниченный областью S_{15} , моделирует взаимодействие клина с водой. Поверхности S_6 и S_7 расположены параллельно друг другу, причем S_7 находится в плоскости симметрии Ox_1x_2 , а S_6 – на расстоянии b от нее. Поверхность S_5 расположена в плоскости Ox_1x_3 параллельно свободной кромке льда S_8 . Свободная кромка льда S_8 находится в одной плоскости с поверхностью S_9 , на которой задаются граничные условия, моделирующие жесткое взаимодействие рассматриваемой области деформирования льда с неподвижным ледяным полем. На поверхностях S_{10} , S_{11} , S_{12} , S_{13} , S_{15} , S_{16} задаются граничные условия, отражающие взаимодействие внедряющегося в лед клина ледокола. Площадки S_{10} и S_{12} характеризуют боковые части клина, причем S_{10} лежит параллельно плоскости Ox_1x_2 на расстоянии $(b_1 + b_2)$, а S_{12} находится под углом α к S_{10} . Области S_{11} и S_{13} расположены параллельно плоскости Ox_1x_3 , моделируют площадки острия и основания клина соответственно. Материал, из которого изготовлен клин, в данной работе не исследуется, клин принимается как жесткое тело.

Построение математической модели

При построении математической модели следует учитывать физико-механические характеристики ледяного покрова. Согласно результатам экспериментальных исследований, описанных в работе [2], лед ведет себя упруго при температурах ниже -30°C и нагрузках менее 1 мин. В данной работе время контакта нагрузок с ледяным покровом $\tau = 0,01$ с, температура окружающей среды $\theta = -30^\circ\text{C}$. Примем лед как упругое тело, по данным работы [1] имеем: модуль Юнга — $E = (87,6 - 0,21\theta - 0,0017\theta^2) \cdot 10^2$ МПа; θ – температура льда; коэффициент Пуассона — $\mu = 0,5 + 0,003\theta$ $\theta > -40^\circ\text{C}$; модуль сдвига — $G = E/2(1 + \mu)$; коэффициент объемного сжатия — $K = (1 - 2\mu)/E$.

Используя уравнения теории упругости для малых деформаций, запишем определяющие дифференциальные уравнения в эйлеровой системе координат.

Уравнение движения

$$\sigma_{ij,j} + F_i - I_i = 0; \quad I_i = \rho \left(\dot{v}_i + \bar{v}_k \frac{\partial v_i}{\partial x_k} \right), \quad (i, j, k = 1, 2, 3). \quad (1)$$

Закон Гука для малых деформаций

$$\sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij} = 2G \varepsilon_{ij}^*; \quad \sigma = \frac{1}{3} \sigma_{ii}, \quad \varepsilon_{ij}^* = \varepsilon_{ij} - 1/3 \varepsilon \delta_{ij}; \quad \varepsilon_{ij} = 0,5(u_{i,j} + u_{j,i}),$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}, \quad (i = 1, 2, 3). \quad (2)$$

Уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \right) = 0; \quad (i = 1, 2, 3), \quad (3)$$

$$\xi_{ij} = \frac{d\varepsilon_{ij}}{d\tau} \Rightarrow \varepsilon_{ij} \cong \sum_m \xi_{ij} \Delta \tau_m, \quad (4)$$

$$\sigma = 3k\varepsilon. \quad (5)$$

В уравнениях (1) – (4) используется суммирование по повторяющимся индексам; ρ – плотность льда; $G = G(\theta)$ – модуль сдвига льда; $[\sigma_{ij}]$ – тензор напряжений; $[\varepsilon_{ij}]$ – тензор деформаций; v_i , F_i – проекции скорости перемещений и удельной объемной силы по координатным осям x_i , $i = 1, 2, 3$; $F_2 = F_3 = 0$; λ – коэффициент теплопроводности; θ – температура льда; $\dot{v}_i = \frac{\partial v_i}{\partial \tau}$, τ – время деформации, K – коэффициент объемного сжатия.

Согласно выбранной модели идеально упругой среды, используя уравнение (5) и соотношение для малых деформаций, приведенное в работе [3], получим $\dot{\sigma} = 3k\xi$, где k – модуль объемного сжатия, определяемый по опытным данным.

Для расчета температурного поля воспользуемся решением уравнения теплопроводности, приведенного в работе [4], поэтому с учетом $\lambda = \lambda_0(1 + a\theta)$ запишем его в конечном виде:

$$\theta = -\frac{1}{a} - \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{x_1}{h} \left(\frac{2\theta_1}{a} + \theta_1^2 \right)}. \quad (6)$$

При выводе формулы (6) использовались граничные условия: при $x_1 = 0$ $\theta = 0$ °С, при $x_1 = h$ $\theta_1 = -30$ °С, h – толщина льда, $a = -0,0159$ град⁻¹.

Начальные условия задачи: $v_i|_{\tau=0} = 0$, $\varepsilon_{ij}|_{\tau=0} = 0$.

Граничные условия задачи (см. рис. 2):

$$\begin{aligned} \sigma_{11}|_{S_1} &= -p_0; v_1|_{S_4} = -v^* \operatorname{tg}(\beta); \sigma_{11}|_{S_2} = -(p_0 + \gamma h); \sigma_{11}|_{S_i} = 0, i = 15, 16; \\ v_1|_{S_i} &= 0, i = 3, 14; \sigma_{22}|_{S_5} = 0; \sigma_{22}|_{S_8} = -p_0; v_2|_{S_9} = 0; v_3|_{S_i} = 0, i = 7, 8; \\ \sigma_{22}|_{S_{13}} &= 0; v_2|_{S_{11}} = -v^*; v_3|_{S_{10}} = 0; v_3|_{S_{12}} = -v^* \sin(\alpha); \\ (\sigma_{12} = \sigma_{13})|_{S_i} &= 0, i = 1, 2, 3, 4, 14, 15, 16; (\sigma_{21} = \sigma_{23})|_{S_i} = 0, i = 5, 8, 11, 13; \\ (\sigma_{31} = \sigma_{32})|_{S_i} &= 0, i = 6, 7, 10, 12. \end{aligned}$$

Здесь p_0 – атмосферное давление, γ – удельный вес льда, h – толщина льда, v^* – скорость передвижения судна, β – угол между носовым отсеком надводной части судна и льдом, принят равным 20°; α – угол острия клина (см. рис. 2), принят равным 35°.

Для решения системы исходных уравнений с учетом принятых граничных условий воспользуемся численным методом, согласно которому область деформирования разбивается на ортогональные элементы конечных размеров; для каждого элемента записывается в разностном виде система исходных уравнений, которая решается по разработанному алгоритму [5] с учетом граничных условий.

Схема решения задачи

1. Исследуемая область деформирования разбивается на элементы ортогональной формы. Рассчитывается матрица длин дуг элементов.
2. Время исследования (деформирования) τ разбивается на m временных промежутков $\tau = \sum_m \Delta \tau_m$.
3. Задаются начальные условия задачи.
4. Задается шаг по времени $\tau = \Delta \tau$.
5. Задаются граничные условия задачи $\bar{v}_i = 0$.

6. Рассчитывается поле температур по каждому элементу.
7. Вычисляются значения модуля сдвига и коэффициент объемного сжатия по каждому элементу.
8. Рассчитывается матрица коэффициентов и свободных членов новой эквивалентной системы в соответствии с последовательностью, описанной в работах [4, 7].
9. Решается система линейных уравнений по алгоритму, описанному в работе [5].
10. По каждому элементу (его граням) (ij) вычисляются σ_{ij} , ν_i , ξ_{ij} , ε_{ij} .
11. Уточняются значения $\bar{\nu}_i$. Производится сравнение $(\bar{\nu}_i)_n$ и $(\bar{\nu}_i)_{n-1}$, n – номер итерации. Если заданная точность соответствия $(\bar{\nu}_i)_n$ и $(\bar{\nu}_i)_{n-1}$ удовлетворяется, то следует операция 12, в противном случае осуществляется операция 8.
12. Окончание расчета.

Анализ результатов

Исследуются явления, возникающие в ледяном покрове различной толщины: $h = 0,5$ м, $h = 0,75$ м и $h = 1,0$ м. В качестве критериев нарушения сплошности ледяного покрова примем напряжения $\sigma_{кр}^{pac} \approx 4$ МПа, $\sigma_{кр}^{сж} \approx -8$ МПа, приведенные в работе [1].

Расчеты проводились при следующих геометрических параметрах устройства: a – расстояние от подводной части судна до окончания исследуемой области деформирования льда, принято равным 12 м; a_1 – глубина внедрения клина в лед, принята равной 2,1 м; a_2 – расстояние от подводной части судна до надводной, принято равным 4,8 м; a_3 – длина площадки контакта надводной части судна с ледяным покровом, принята равной 0,3 м; b_1 – половина ширины площадки контакта надводной части судна с ледяным покровом, принята равной 3,5 м; b_2 – расстояние от надводной части судна до клина, принято равным 1,0 м; b_3 – ширина клина, принята равной 1,3 м; b_4 – длина свободной кромки ледяного покрова 0,9 м; c – расстояние от свободной кромки льда до края рассматриваемой области деформирования ледяного покрова, принято равным 7,1 м; d – длина подводной части судна, контактирующей со льдом, принята равной 2 м; d_1 – половина ширины площадки контакта подводной части судна с ледяным покровом, принята равной 1,75 м.

Скорость перемещения устройства 7 км/ч. Время контакта системы нагрузок со льдом $\Delta\tau = 0,01$ с.

Для проведения анализа НДС льда рассмотрим поверхность льда, которая контактирует с воздухом.

На рис. 3 – 5 приведены схемы областей нарушения сплошности ледяного покрова, имеющего толщины $h = 0,5$ м, $h = 0,75$ м, $h = 1,0$ м соответственно. Волнистыми линиями обозначены места нарушения сплошности льда.

В окрестности внедрения клина в ледяном покрове присутствуют сжимающие напряжения: при $h = 0,5$ м $\sigma_{22} = -37,8$ МПа, $\sigma_{33} = -34,0$ МПа; при $h = 0,75$ м $\sigma_{22} = -31,4$ МПа, $\sigma_{33} = -31,5$ МПа; при $h = 1,0$ м $\sigma_{22} = -32,9$ МПа, $\sigma_{33} = -32,0$ МПа. Между надводной и подводной частями судна в ледяных покровах с толщинами $h = 0,75$ м, $h = 1,0$ м (рис. 4, 5) имеют место сжимающие напряжения, а при $h = 0,5$ м (рис. 3) сжимающие напряжения переходят в растягивающие напряжения на расстоянии 1,5 м от надводной части судна.

Максимальные сжимающие напряжения при толщинах льда $h = 0,5$ м, $h = 0,75$ м, $h = 1,0$ м равны -43,8 МПа, -82,7 МПа, -82,4 МПа соответственно и находятся на расстоянии 2 м, 4,2 м, 1 м от подводной части.

Максимальные растягивающие напряжения в ледяном покрове, имеющем толщины $h = 0,5$ м, $h = 0,75$ м, $h = 1,0$ м, равны 44,4 МПа, 84,7 МПа, 98,2 МПа и находятся на расстоянии 1 м, 4,2 м, 1 м от подводной части.

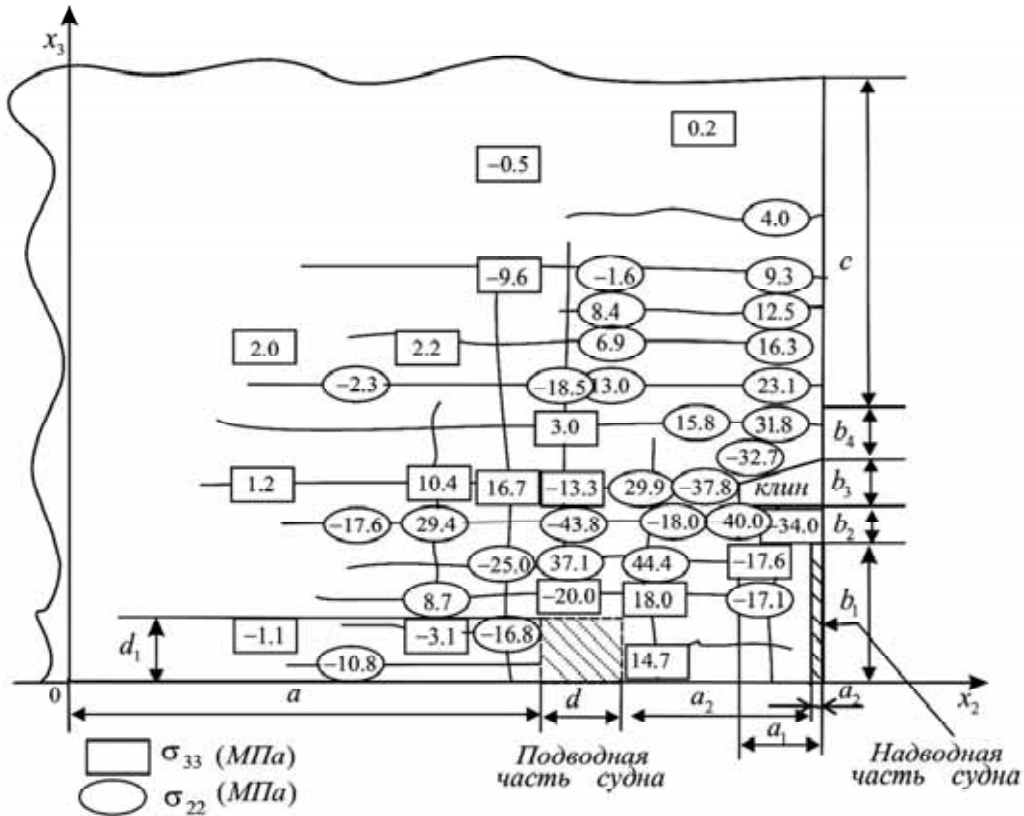


Рис. 3. Схема, поясняющая возникновение нарушений сплошности в ледяном покрове при толщине льда 0,5 м

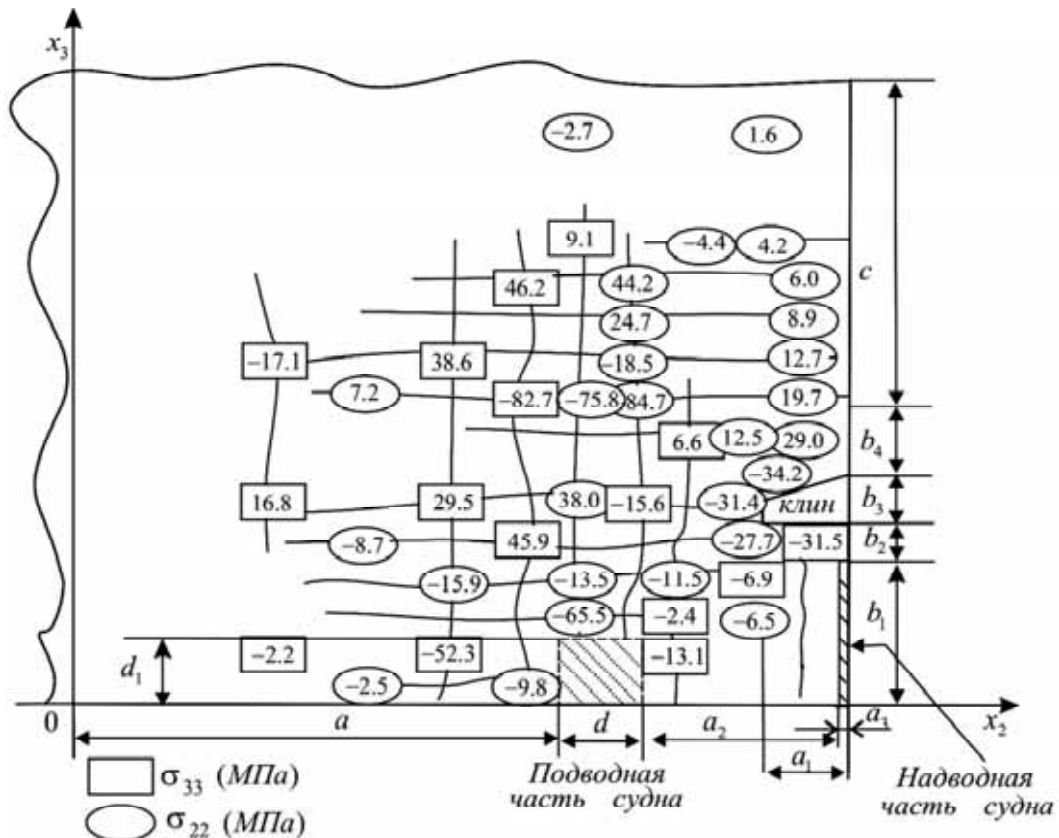


Рис. 4. Схема, поясняющая возникновение нарушений сплошности в ледяном покрове при толщине льда 0,75 м

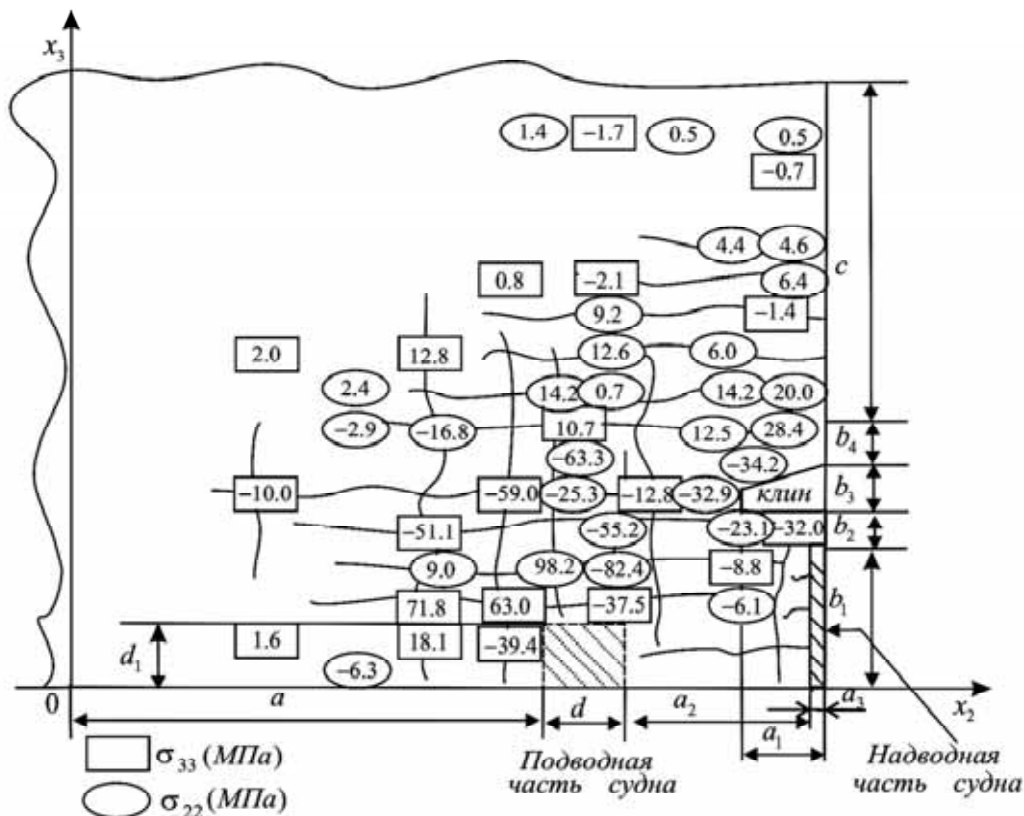


Рис. 5. Схема, поясняющая возникновение нарушений сплошности в ледяном покрове при толщине льда 1,0 м

Анализируя НДС ледяного покрова, можно отметить, что имеющееся распределение сжимающих и растягивающих напряжений – свидетельство чередования вздутий и впадин. При толщине льда 1 м наблюдается область ледяного покрова с наибольшими напряжениями.

Схемы НДС льда, представленные на рис. 3 – 5, свидетельствуют о том, что будет иметь место нарушение сплошности ледяного покрова, но говорить о его полном разрушении невозможно без проведения дополнительных теоретических исследований с более сложным алгоритмом и дополнительным уточнением меняющихся граничных условий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богородский, В. В. Лёд. Физические свойства. Современные методы гляциологии / В. В. Богородский, В. П. Гаврило. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 384 с.
2. Войтковский, К. Ф. Экспериментальные исследования пластических свойств льда / К.Ф. Войтковский // Сезонное промерзание грунтов и применение льда для строительных целей. – М.: Изд-во АН СССР, 1957.
3. Качанов, Л. М. Основы теории пластичности / Л. М. Качанов. – М.: Наука, 1969. – 420 с.
4. Одинок, В. И. Математическое моделирование процесса разрушения льда ледокольной приставкой / В. И. Одинок, А. М. Сергеева. – Владивосток: Дальнаука, 2007. – С. 153.
5. Одинок, В. И. Построение математической модели для анализа процесса разрушения ледяного покрова / В. И. Одинок, А. М. Сергеева, Е. А. Захарова // Математическое моделирование. – 2008. – Т. 20, № 12. – С. 15-27.
6. Пат. 2276037 Российская Федерация, МПК В 63 В 35/08. Ледокольное судно / Одинок В.И., Колмогоров В.Л. – № 2004114052/11; заявл. 06.05.2004; опубл. 10.05.2006, Бюл. № 13.
7. Сергеева, А. М. Моделирование экологически безопасного способа разрушения ледяного покрова / А. М. Сергеева, В. И. Одинок // Инженерная экология. – 2009. – № 3. – С. 53-62.

Сергеева А. М., Ткачева А. В.
A.M.Sergeeva, A.V.Tkacheva

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛЕДОКОЛЬНОГО УСТРОЙСТВА, СПОСОБСТВУЮЩЕГО ДЕФОРМИРОВАНИЮ И РАЗРУШЕНИЮ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

MATHEMATICAL MODEL OF AN ICEBREAKING DEVICE ATTACHED TO A SEA VESSEL THAT CAUSES DEFORMATION AND DESTRUCTION OF ICE COVER



Сергеева Анастасия Михайловна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: serg-nasty@mail.ru

Ms. Anastasiya M. Sergeeva – PhD of Physics and Mathematics, Senior Research Fellow, Institute for Machine Engineering and Metallurgy of the Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: serg-nasty@mail.ru

Ткачева Анастасия Валерьевна - аспирант Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: 4nansi4@mail.ru

Ms. Anastasiya V. Tkacheva - PhD Candidate, Institute for Machine Engineering and Metallurgy of the Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: 4nansi4@mail.ru

Аннотация: с использованием теории малых упругих деформаций и определенного численного метода строится математическая модель ледокольного устройства в виде катамарана. В работе решается пространственная задача о деформировании ледяного покрова ледокольной приставкой, проводится анализ зависимости ледоразрушающей способности устройства от скорости его движения.

Abstract: Applying the theory of small elastic deformations and a numerical method, a mathematical model of an icebreaking device in the form of a catamaran is built. The paper provides a solution to a spatial problem of deformation of ice cover by an icebreaking device, analysis is carried out of the dependence of ice-breaking ability of the device on the speed of its movement.

Ключевые слова: математическое моделирование, численные методы, напряженно-деформированное состояние ледяного покрова.

Key words: mathematic modeling, numerical methods, stress-strain state of ice cover.

УДК 621.771: 539.3

Работа выполнена при поддержке РФФИ 11-01-98500-р_восток_a

Введение. С появлением на реках ледяного покрова, эксплуатация водного транспорта становится невозможным. Решением этой проблемы может стать использование ледоразрушающего устройства, которое очистит фарватер ото льда. Одно из таких устройств рассмотрено в данной работе.

Работа направлена на изучение напряженно - деформированного состояния (НДС) ледяного покрова, которое вызвано динамической нагрузкой. Целью работы является исследование зависимости НДС льда от скорости передвижения ледокольного устройства.

Описание устройства. Рассмотрим ледоразрушающее устройство, защищенное патентом [6]. В носовой оконечности судна 1 (рис.1) при помощи креплений 2 устанавливаются

Сергеева А. М., Ткачева А. В.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛЕДОКОЛЬНОГО УСТРОЙСТВА, СПОСОБСТВУЮЩЕГО
ДЕФОРМИРОВАНИЮ И РАЗРУШЕНИЮ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

ледокольную приставку 3, перед которой в ледяном покрове 4 создают свободную кромку. Приставку 3 выполняют в виде плавучей емкости, в диаметральной плоскости которой устанавливают форштевень 6, наклоненный под углом β к горизонтальной поверхности. При достаточном расстоянии l между клиньями возникают усилия, приводящие к потере устойчивости формы участка льда, заключенного между ножами. Отломанные участки льда прижимаются наклонным днищем приставки, и его обломки раздвинутся под кромки образовавшегося канала.

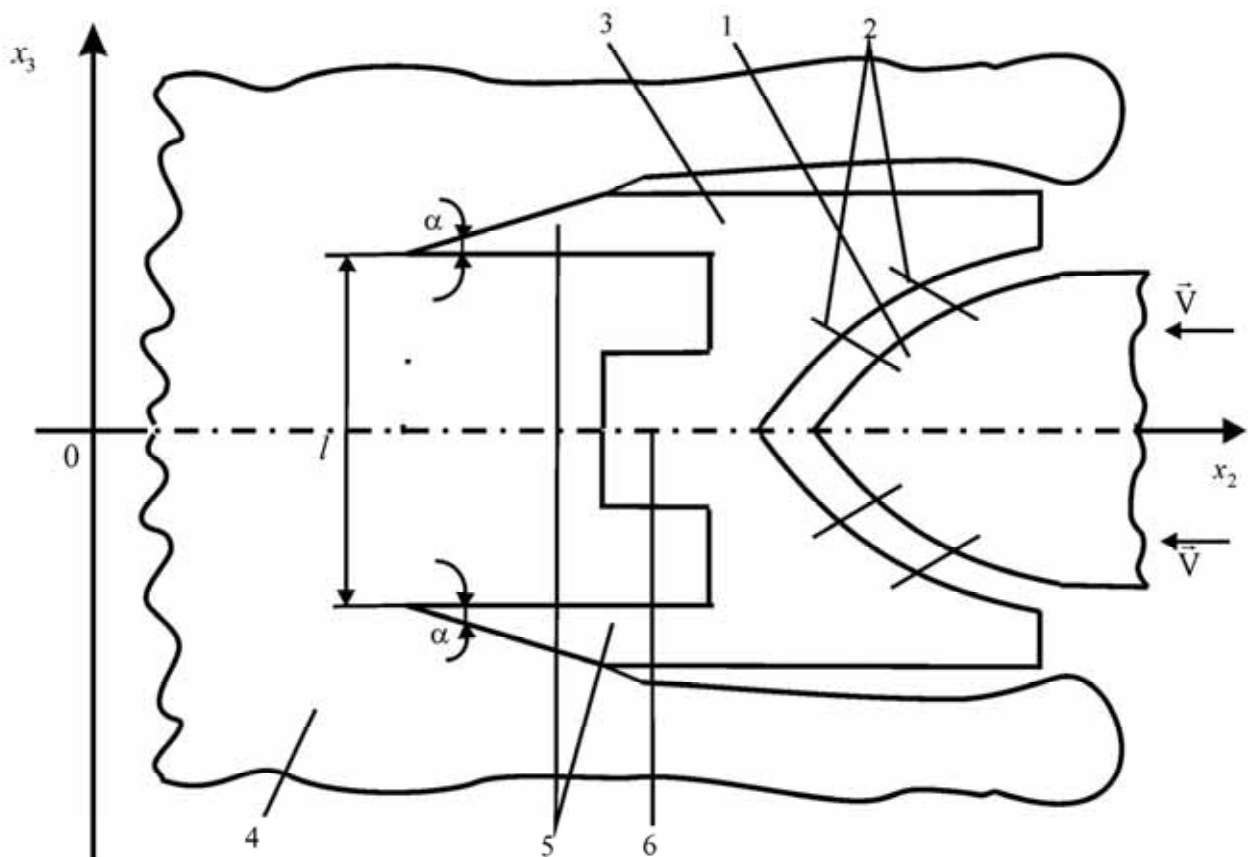


Рис.1 Схема ледокольной приставки

Данное устройство является симметричным относительно плоскости симметрии, проходящей вдоль судна от носовой части до кормы. Поэтому рассмотрим 1/2 области деформирования льда и 1/2 носовой части ледоразрушающего устройства (рис. 2).

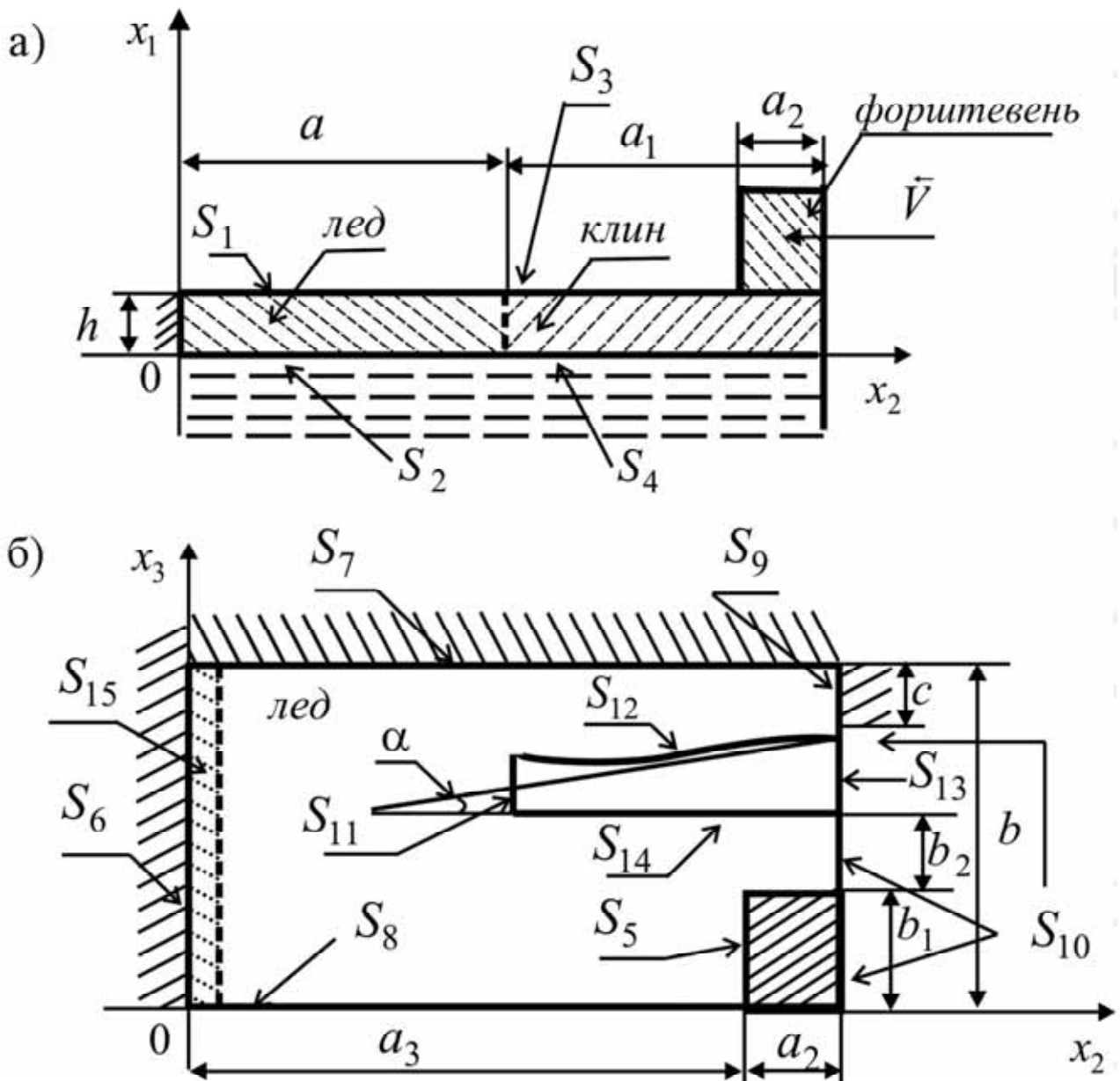


Рис.2 Схема, поясняющая взаимодействие ледокольной приставки с ледяным покровом: а — в плоскости Ox_1x_2 , б — в плоскости Ox_2x_3 .

Схема нагружения ледяного покрова, осуществляемого ледокольной приставкой представлена на рисунке 2.

Плоскость, расположенную на расстоянии h (h — толщина льда) от плоскости Ox_2x_3 , разобьем на три области S_1 , S_3 , S_5 , где S_1 — поверхность, моделирующая взаимодействия льда с атмосферой, S_3 — область взаимодействия клина с атмосферой, S_5 — область контакта надводной части форштевня с ледяным покровом. В плоскости Ox_2x_3 выделим две поверхности S_2 и S_4 , где S_2 — характеризует взаимодействие льда с несжимаемой идеальной жидкостью — водой, S_4 — область взаимодействия клина с водой. Поверхности S_8 и S_7 расположены параллельно друг другу, причем S_8 находится в плоскости симметрии, а S_7 на

расстоянии b от нее. Поверхность S_6 расположена в плоскости Ox_1x_3 и на расстоянии $a_3 + a_2$ от нее параллельно расположены поверхности S_{10} , S_{13} , S_9 , где S_{10} — свободной кромки льда, S_{13} — площадка основания клина, S_9 — моделирует жесткое взаимодействие рассматриваемой области с неподвижным ледяным полем. Площадки S_{10} и S_{12} характеризуют боковые части клина, причем S_{10} лежит параллельно плоскости Ox_1x_2 на расстоянии $(b_1 + b_2)$, а S_{12} находится под углом α к S_{10} . Область S_{11} , расположена параллельно плоскости Ox_1x_3 , характеризует площадку острие клина. Материал, из которого изготовлена ледокольная приставка, в данной работе не исследуется, клин принимается как жесткое тело.

Построение математической модели.

При построении математической модели следует учитывать физико-механические свойства пресноводного ледяного покрова.

Пусть лед несжимаемая среда с температурной анизотропией по толщине, из работы [2] известно, что при температурах ниже -30°C и при нагрузках менее 1 минуты ведет себя упруго. В данной работе температура окружающей среды $\theta = -30^\circ\text{C}$, время контакта устройства с ледяным покровом менее 1 минуты. Примем лед как упругое тело, по данным работы [1] имеем: модуль Юнга — $E = (87.6 - 0.21\theta - 0.0017\theta^2) \cdot 10^2 \text{ МПа}$; θ — температура льда; коэффициент Пуассона — $\mu = 0.5$; модуль сдвига — $G = E / 2(1 + \mu)$.

Используя уравнения теории упругости для малых деформаций, запишем систему дифференциальных уравнений в эйлеровой системе координат.

Уравнение движения

$$\sigma_{ij,j} + F_i - I_i = 0; \quad I_i = \rho \left(\dot{v}_i + v_k \frac{\partial v_i}{\partial x_k} \right), \quad (i, j, k = 1, 2, 3). \quad (1)$$

Закон Гука для малых деформаций

$$\sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij} = 2G \varepsilon_{ij}^*; \quad \sigma = \frac{1}{3} \sigma_{ii}, \quad \varepsilon_{ij}^* = \varepsilon_{ij} - 1/3 \varepsilon \delta_{ij}; \quad \varepsilon_{ij} = 0.5(u_{i,j} + u_{j,i}),$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}, \quad (i, j = 1, 2, 3); \quad \xi_{ij} = \frac{d\varepsilon_{ij}}{d\tau} \Rightarrow \varepsilon_{ij} \cong \sum_m \xi_{ij} \Delta \tau_m, \quad (2)$$

Уравнение сохранения массы

$$v_{i,i} = 0, \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3)$$

Уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \right) = 0; \quad (i = 1, 2, 3). \quad (4)$$

В уравнениях (1, 2, 3, 4) используется суммирование по повторяющимся индексам; ρ — плотность льда; $G = G(\theta)$ — модуль сдвига льда; $[\sigma_{ij}]$ — тензор напряжений; $[\varepsilon_{ij}]$ — тензор деформаций; v_i , F_i — проекции скорости перемещений и удельной объемной силы по координатным осям x_i , $i = 1, 2, 3$; $F_2 = F_3 = 0$; λ — коэффициент теплопроводности; θ — температура льда; $\dot{v}_i = \frac{\partial v_i}{\partial \tau}$, τ — время деформации, K — коэффициент объемного сжатия.

Начальные условия задачи $v_i|_{\tau=0} = 0$, $\varepsilon_{ij}|_{\tau=0} = 0$.

Граничные условия задачи (рис.2).

$$\sigma_{11}|_{S_1} = -p_0; \quad \sigma_{11}|_{S_2} = -(p_0 + \gamma h); \quad \sigma_{11}|_{S_i} = 0, \quad i=3, 4;$$

$$\begin{aligned}
 &(\sigma_{12} = \sigma_{13})|_{S_i} = 0, \quad i=1, 2, 3, 4, 5, 15; \quad \sigma_{22}|_{S_i} = 0; \quad i=6, 13; \\
 &(\sigma_{21} = \sigma_{23})|_{S_i} = 0; \quad i=6, 10, 11, 13; \quad v_2|_{S_i} = 0, \quad (\sigma_{31} = \sigma_{32})|_{S_i} = 0, \quad i=7, 8; \\
 &v_3|_{S_i} = 0, \quad i=7, 8, 14; \quad v_1|_{S_5} = -V \operatorname{tg}(\beta); \quad v_1|_{S_{15}} = 0; \quad v_2|_{S_{11}} = -V; \quad v_3|_{S_{12}} = V \sin(\alpha).
 \end{aligned}$$

Здесь p_0 — атмосферное давление, γ — удельный вес льда, h — толщина льда, V — скорость передвижения судна, β — угол наклона форштевня к горизонту принят равным 15° , α — угол острия клина (рис.2) принят равным 35° .

Для расчета температурного поля воспользуемся решением уравнения теплопроводности приведенного в работе [4], поэтому с учетом $\lambda = \lambda_0(1 + a\theta)$ запишем его в конечном виде:

$$\theta = -\frac{1}{a} - \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{x_1}{h} \left(\frac{2\theta_1}{a} + \theta_1^2 \right)}. \quad (6)$$

При выводе (6) использовались граничные условия при $x_1 = 0$, $\theta = 0^\circ \text{C}$ при $x_1 = h$, $\theta_1 = -30^\circ \text{C}$, h — толщина льда, $a = -0.0159$ град $^{-1}$.

Для решения системы исходных уравнений с учетом принятых граничных условий и параметров, характеризующих свойства пресноводного льда, применялся определенный численный метод. Согласно выбранному методу определялась система разрешающих уравнений, решаемая по разработанному алгоритму [7] с учетом граничных условий.

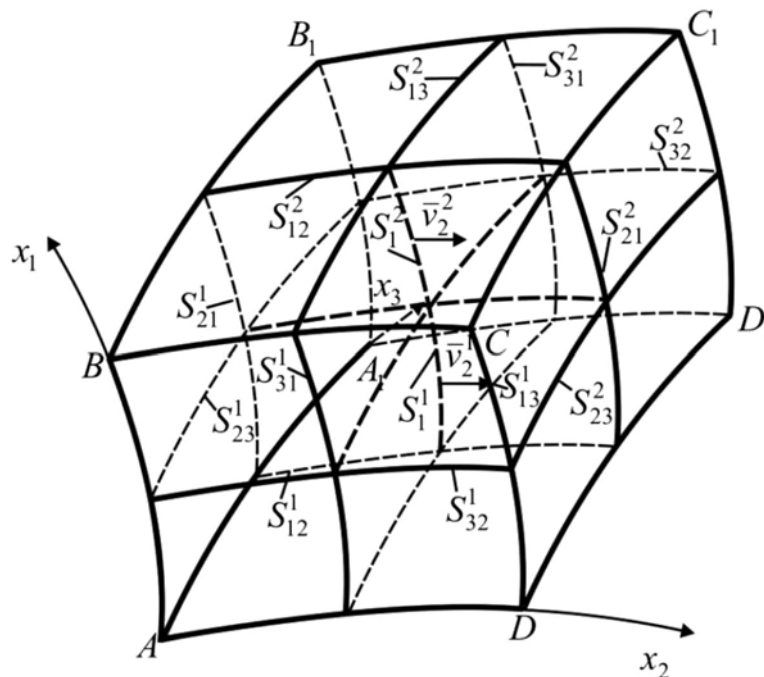


Рис.3. Ортогональный элемент

Уравнение движения запишем в разностной форме для произвольного ортогонального криволинейного элемента (рис.3):

$$\begin{aligned}
 &S_{ik} \Delta S_{ij} (\sigma_{ii} - \sigma_{jj}) + S_{ij} \Delta S_{ik} (\sigma_{ii} - \sigma_{kk}) + 1/2 \Delta \sigma_{ii} S_{ij} S_{ik} + \\
 &+ 1/2 \Delta \sigma_{ik} S_{ki} S_{kj} + 1/2 \Delta \sigma_{ij} S_{ji} S_{jk} + (S_{ji} \Delta S_{jk} + 2S_{jk} \Delta S_{ji}) \sigma_{ij} + \\
 &+ (S_{ki} \Delta S_{kj} + 2S_{kj} \Delta S_{ki}) \sigma_{ik} + (F_i - I_i) \cdot 2V^* = 0.
 \end{aligned}$$

Здесь $i, j, k=1,2,3; i \neq j \neq k$; V^* — объем элемента; $V = \frac{1}{8} S_{12} \cdot S_{13} \cdot S_{21}$; I_i — проекции инерционной силы, отнесенной к единице объема на оси $x_i, i, j, k=1,2,3$; $S_{ij} = S_{ij}^1 + S_{ij}^2$ — величина дуги средней линии, расположенной на грани j вдоль координаты x_j и перпендикулярной координате x_i ; $\Delta S_{ij} = S_{ij}^2 - S_{ij}^1$; $S_{ik}^j (i, k=1,2,3; i \neq k; j=1,2)$. Значения S_{ik}^j вычисляются как средние от значений дуг ребер (рис.3). Например, $S_{23}^1 = 0,5 \left(\left| \overset{\cup}{AA_1} \right| + \left| \overset{\cup}{BB_1} \right| \right)$. $\sigma_{ii}^L (i=1,2,3; L=1,2)$ — нормальное напряжение, действующее на криволинейной поверхности «L» элемента, нормалью к которой является касательная к координате x_i ; $\sigma_{ij} = 0,5(\sigma_{ij}^1 + \sigma_{ij}^2)$, $\Delta \sigma_{ij} = \sigma_{ij}^2 - \sigma_{ij}^1$, $(i, j=1,2,3), i \neq j$, σ_{ij}^L — касательное напряжение, действующее на криволинейной поверхности «L» элемента, нормалью к которой является касательная к координате x_i .

Скорости сдвиговых деформаций $\xi_{ij} (i \neq j)$ по элементу определяются как средние от значений скоростей деформаций в узлах элемента

$$\xi_{ij} = 0,125(\xi_{ij}^A + \xi_{ij}^B + \xi_{ij}^D + \xi_{ij}^C + \xi_{ij}^{A_1} + \xi_{ij}^{B_1} + \xi_{ij}^{D_1} + \xi_{ij}^{C_1}) .$$

Значение скорости сдвиговой деформации в узле определяется по формуле

$$\xi_{ij}^0 = \frac{2\Delta \bar{v}_j}{S_i} - 0,5 \bar{v}_j \frac{S_j^+ - S_j^-}{S_i S_j} + \frac{2\Delta \bar{v}_i}{S_j} - 0,5 \bar{v}_i \frac{S_i^+ - S_i^-}{S_i S_j}, (i, j=1,2,3; i \neq j),$$

где $S_i = S_i^1 + S_i^2$; $S_i^+ = S_i^{1+} + S_i^{2+}$; $S_i^- = S_i^{1-} + S_i^{2-}$; $\Delta \bar{v}_i = \bar{v}_i^2 - \bar{v}_i^1$.

Здесь S_i^{1+}, S_i^{1-} — дуга граней элемента, следующая за S_i^1 по координате j соответственно в положительную (+) и отрицательную (-) стороны; аналогично S_i^{2+}, S_i^{2-} — только относительно S_i^2 ; значения $\bar{v}_i^j (j=1,2)$ вычисляются как средние от значений v_i^j по граням, примыкающих к данному ребру.

Схема решения задачи.

1. Исследуемая область деформирования разбивается на элементы ортогональной формы. Рассчитывается матрица длин дуг элементов.
2. Время исследования (деформирования) τ разбивается на m временных промежутков $\tau = \sum_m \Delta \tau_m$.
3. Задаются начальные условия задачи, $\bar{v}_i = 0$.
4. Задаем шаг по времени $\tau = \Delta \tau$.
5. Задаются граничные условия задачи.
6. Насчитывается поле температур по каждому элементу.
7. Насчитываются значения модуля сдвига по каждому элементу.
8. Насчитывается матрица коэффициентов и свободных членов новой эквивалентной системы в соответствии с последовательностью, описанной в работах [4, 5].
9. Решается система линейных уравнений по алгоритму, описанному в работе [7].
10. По каждому элементу (его граням) (ij) насчитываются $\sigma_{ij}, v_i, \xi_{ij}, \varepsilon_{ij}$.
11. Уточняются значения \bar{v}_i . Производится сравнение $(\bar{v}_i)_n$ и $(\bar{v}_i)_{n-1}$, n — номер итерации. Если заданная точность соответствия $(\bar{v}_i)_n$ и $(\bar{v}_i)_{n-1}$ удовлетворяется, то следует операция 12, в противном случае осуществляется операция 8.
12. Окончание расчета.

Анализ численных результатов. В данной работе исследуется НДС ледяного покрова, возникающее при воздействии на него ледоразрушающим устройством со скоростью пере-

движения на чистой воде $V=6$ км/ч, $V=8$ км/ч, $V=10$ км/ч. В качестве критериев нарушения сплошности ледяного покрова примем напряжения $\sigma_{кр}^{рас} \approx 4$ МПа, $\sigma_{кр}^{сж} \approx -8$ МПа, приведенные в работе [1].

На рис. 4, 5, 6 представлены схемы областей ледяного покрова, в которых возникают нарушения сплошности (верхний слой толщиной 0.3 м). Нарушения сплошности обозначены волнистыми линиями. Приведены результаты численного решения при скоростях передвижения устройства $V=6$ км/ч (рис.4), $V=8$ км/ч (рис.5), $V=10$ км/ч (рис.6).

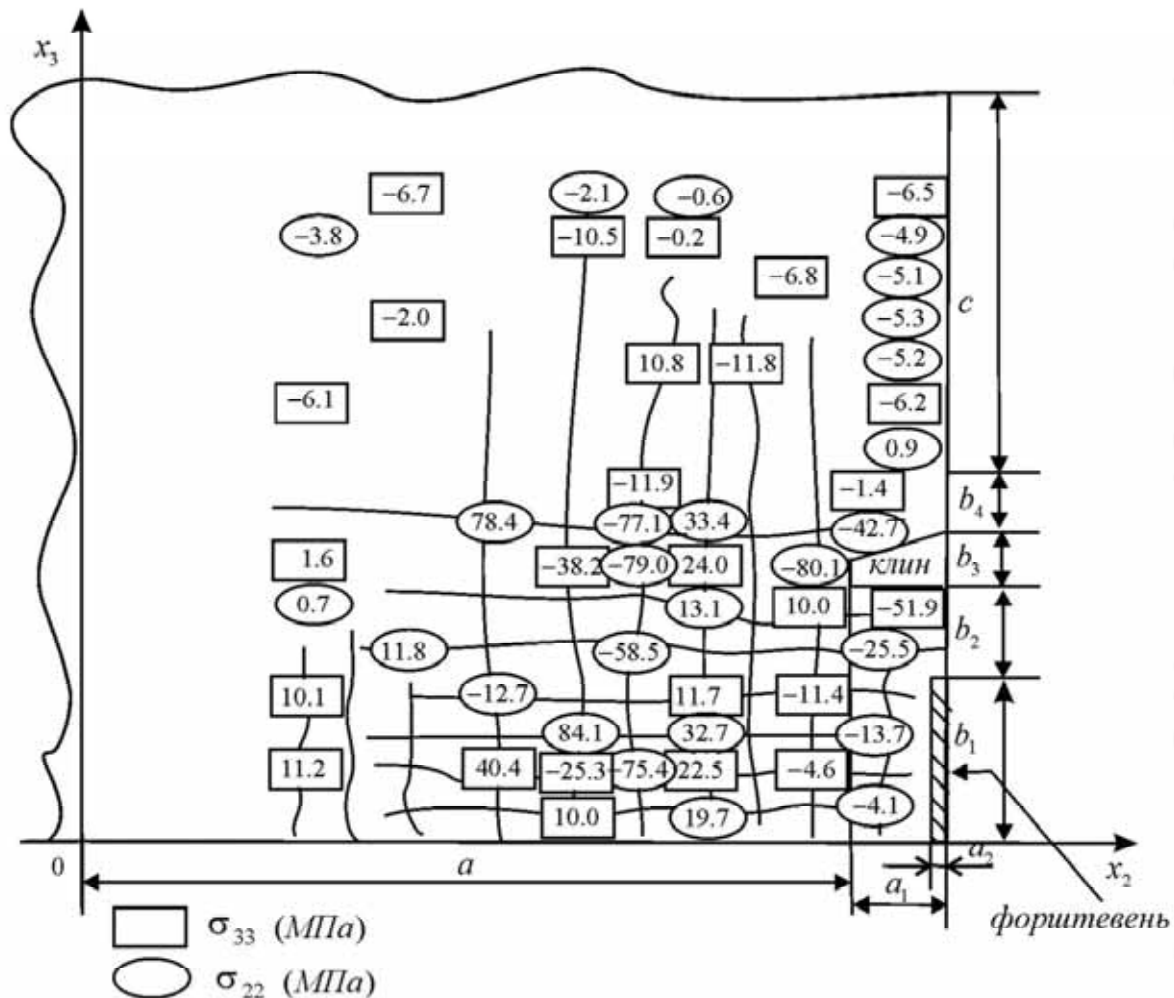


Рис. 4 Схемы, поясняющие возникновение нарушений сплошности в ледяном покрове $V=6$ км/ч

Расчеты проводились при следующих геометрических параметрах устройства: a - длина льда от клина до закрепленной части льда 16.5 м; a_1 - глубина внедрения клина в лед 2.1 м; a_2 - ширина площадки контакта форштевня с ледяным покровом принята равной 0.3 м; b - ширина исследуемой области ледяного покрова 16 м (рис. 2 б); b_1 - половина ширины форштевня 3.5 м; b_2 - расстояние от форштевня до клина 2 м; b_3 - ширина клина у основания принята равной 1.13 м; b_4 - ширина свободной кромки льда от клина до закрепленной части льда 1.1 м. Толщина льда 1.0 м. Время контакта системы нагрузок со льдом $\Delta\tau = 0.01$ с.

Рассмотрим подробнее НДС ледяного покрова в области внедрения клина, при $V=6$ км/ч, $V=8$ км/ч здесь действуют как сжимающие, так и растягивающие напряжения, а при $V=10$ км/ч

только сжимающие напряжения. Напротив острия клина во всех трех случаях фиксируется сжимающее напряжение.

Сбоку от устройства при $V=6\text{км/ч}$ имеют место сжимающие напряжения, при $V=8\text{км/ч}$, $V=10\text{км/ч}$ присутствуют и растягивающие напряжения. В области находящейся между клиньями устройства при всех рассматриваемых скоростях фиксируются сжимающие напряжения.

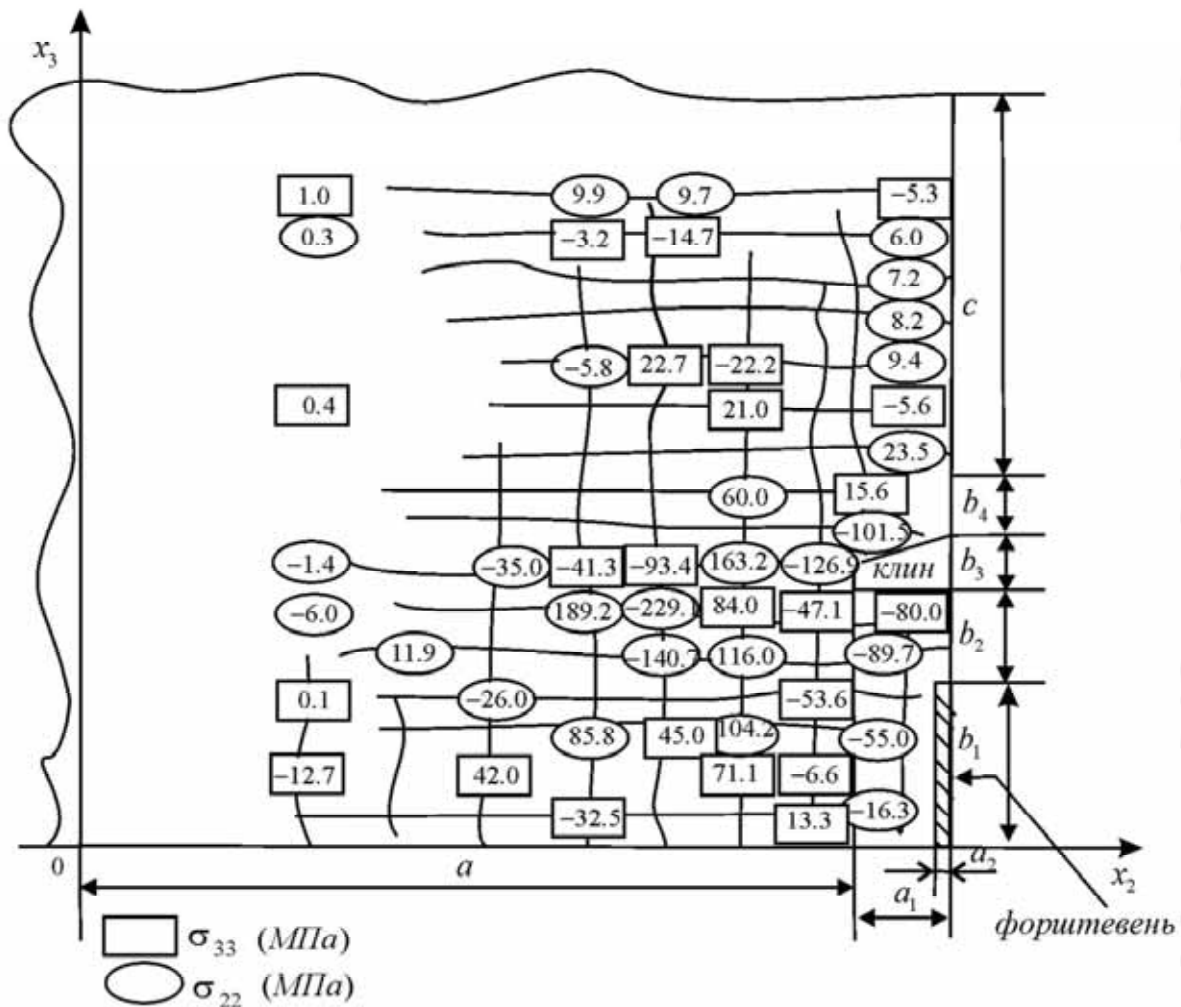


Рис. 5 Схемы, поясняющие возникновение нарушений сплошности в ледяном покрове $V=8\text{ км/ч}$

При скорости движения устройства $V=6\text{км/ч}$ в ледяном покрове существуют максимальное сжимающее напряжение $\sigma_{22} = -80.1\text{МПа}$, сосредоточенное напротив острия клина, и максимальное растягивающее напряжение $\sigma_{22} = 84.1\text{МПа}$, расположенное на расстоянии 8.8 м фронтально от форштевня.

При скорости движения устройства $V=8\text{км/ч}$ в ледяном покрове имеет место максимальное сжимающее напряжение $\sigma_{22} = -229.1\text{МПа}$, расположенное на расстоянии 9 м от устройства, и максимальное растягивающее напряжение $\sigma_{22} = 189.2\text{МПа}$, сосредоточенное на расстоянии 10 м от устройства в направлении к оси Ox_3 .

Максимальные сжимающие и растягивающие напряжения $\sigma_{22} = -66.8\text{МПа}$ и $\sigma_{33} = 73.5\text{МПа}$ расположенные в ледяном покрове в области острия клина, наблюдаются при скорости движения устройства $V=10\text{км/ч}$.

Анализируя характер распределения напряжений на поверхности льда можно сделать вывод о том, что имеет место чередование растягивающих и сжимающих напряжений, такой

характер напряжений свидетельствует о том, что на поверхности льда имеются вздутия и впадины.

В результате проделанной работы можно сделать вывод: что при скорости устройства $V=8$ км/ч в ледяном покрове возникнут наибольшие напряжения.

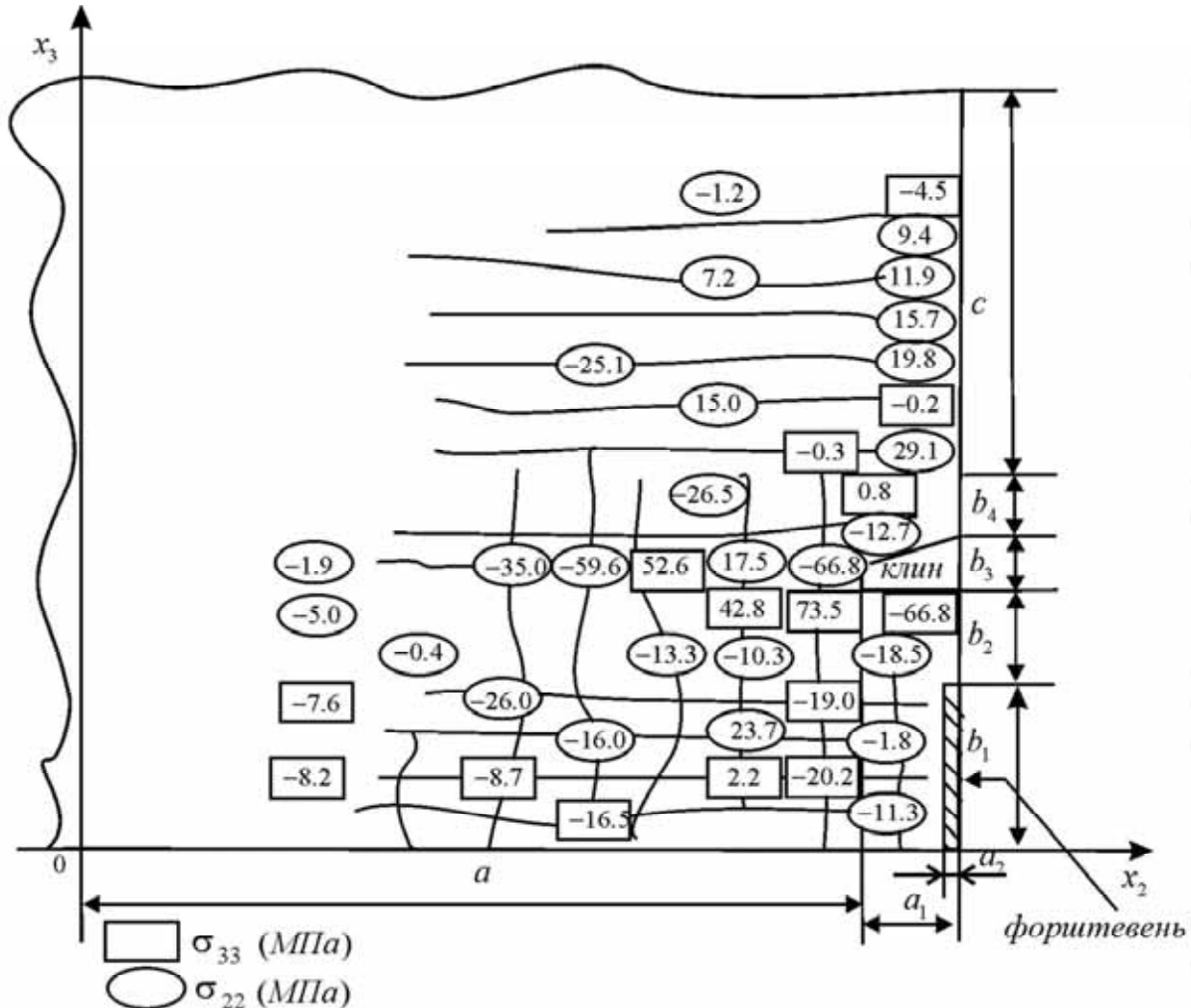


Рис. 6 Схемы, поясняющие возникновение нарушений сплошности в ледяном покрове $V=10$ км/ч.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богородский В.В., Гаврило В.П. Физические свойства. Современные методы гляциологии. Л.: Гидрометеиздат, 1980.
2. Войтковский К.Ф. Экспериментальные исследования пластических свойств льда / Сезонное промерзание грунтов и применение льда для строительных целей. М.: Издательство АН СССР, 1957.
3. Качанов Л. М. Основы теории пластичности. / Качанов Л. М. М.: Наука, 1969 – С. 420.
4. Одинокое В. И., Сергеева А. М. Математическое моделирование процесса разрушения льда ледокольной приставкой.// Владивосток Дальнаука, 2007.-С. 153.
5. Одинокое В. И., Сергеева А. М., Захарова Е. А. Построение математической модели для анализа процесса разрушения ледяного покрова.//Математическое моделирование 2008 т.20 №12 С. 15-27.
6. Пат. 2276037 РФ МПК В 63 В 35/08. Ледокольное судно / Одинокое В.И., Колмогоров В.Л. - № 2004114052/11; Заяв. 06.05.2004; Оpubл. 10.05.2006, Бюл. № 13..
7. Сергеева А. М., Одинокое В. И. Моделирование экологически безопасного способа разрушения ледяного покрова.// Инженерная экология, 2009 №3 С.53-62.

Прокудин А.Н.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОГО СПОСОБА РАЗРУШЕНИЯ ЛЕДЯНЫХ ЗАТОРОВ
НА РЕКАХ ДИНАМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Прокудин А. Н.

A.N.Prokudin

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОГО СПОСОБА РАЗРУШЕНИЯ ЛЕДЯНЫХ
ЗАТОРОВ НА РЕКАХ ДИНАМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ**

**NUMERICAL INVESTIGATION OF A NEW ICE-JAMS REMOVAL METHOD BY
MEANS OF DYNAMIC IMPACT**

Прокудин Александр Николаевич – аспирант Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681005, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1. E-mail: sunbeam_85@mail.ru

Mr. Alexander N. Prokudin – PhD Candidate, Institute for Machine Engineering and Metallurgy of the Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Komsomolsk-on-Amur, Russia). Mailing address: 1 Metallurgov St., Komsomolsk-on-Amur, Russia. Phone: + (4217) 54-95-39. E-mail: sunbeam_85@mail.ru

Аннотация. На основе уравнений механики деформируемого твердого тела и гидродинамики строится математическая модель нового безопасного способа ликвидации ледяных заторов. Сформулированная система уравнений в частных производных решается апробированным численным методом. Приведены и проанализированы результаты численных расчетов, определены параметры устройства, при которых возможно разрушение ледяного затора.

Summary. On the basis of equations of deformed solid body mechanics and hydrodynamics, the mathematical model of a new safe method for ice jam destruction is built. The defined set of partial differential equations is solved by a proven numerical method. The results of numerical calculations are presented and analyzed. The parameters of a device are determined that allow for destruction of ice jams in rivers.

Ключевые слова: разрушение ледяных заторов, напряженно-деформированное состояние, математическое моделирование, динамическое воздействие, уравнения механики сплошных сред.

Key words: destruction of ice-jams, stress-strain state, mathematical modeling, dynamic impact, continuum mechanics equations.

УДК 539.3

Введение

На многих реках северного полушария, текущих с юга на север, во время весеннего ледохода часто образуются ледяные заторы – скопления льда в русле реки. Ледяные заторы вызывают уменьшение живого сечения реки и приводят к повышению уровня воды в месте возникновения и в некотором районе выше него. Ледяные заторы могут привести к катастрофическим наводнениям и разрушению гидротехнических сооружений на реке. Основным методом ликвидации ледяных заторов является взрывной метод, при котором либо на определенной глубине подо льдом, либо внутри затора подрываются заряды взрывчатого вещества. Недостатками взрывного метода являются высокие энергетические затраты, необходимость обеспечения безопасности людей, устанавливающих заряды, вред, наносимый экологии водоема. Работа посвящена численному исследованию нового запатентованного способа разрушения ледяных заторов [5], в котором отсутствуют вышеперечисленные недостатки. Способ заключается в следующем: под лед или его нагромождение заводится устройство, изображенное на рис. 1, состоящее из цилиндра 1, направленного дном в сторону нижней поверхности льда, имеющего каналы 2, по которым проходит гибкая система 3. По ней в область 4 подается газозвдушенная смесь. Маневренность конструкции осуществляется системой двигателей и механизмов 5.

Ликвидация ледяного затора с помощью данного устройства осуществляется следующим образом: устройство с помощью установленных на нем видеокамер и двигательных средств заводится под образовавшийся ледяной затор. Управление устройством осуществляется с передвижной станции, находящейся на берегу, по гибкой системе 3, включающей газовый шланг и электропровод.

После установки устройства под локальную область ледяного затора со станции по гибкой системе 3 поступает определенный объем газовой смеси, вытесняющий воду из пространства под стаканом 1, образуя газоздушную подушку 4. В качестве газовой смеси может использоваться, например, природный газ. Затем по этой же системе 3 подается искровой разряд в свечи 6. Происходит взрыв газовой смеси. В результате взрыва цилиндр устремляется вверх, ломая локальную область ледяного затора. После взрыва газ выходит через многочисленные отверстия в боковой стенке цилиндра 1, устройство приходит в исходное состояние и перемещается подо льдом в новое место.

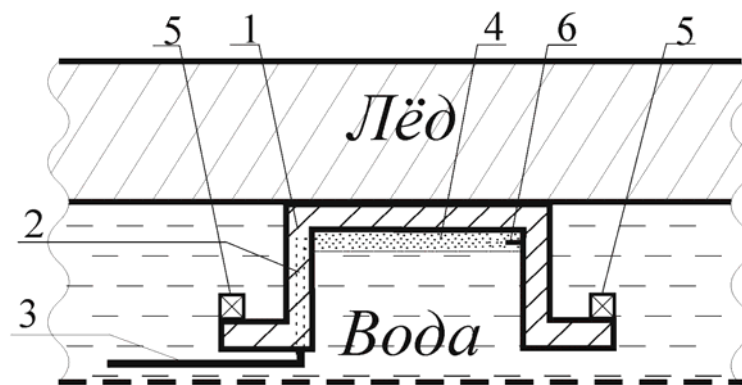


Рис. 1. Устройство для разрушения ледяного покрова

Следует отметить, что природный газ значительно дешевле эквивалентного по теплоте взрыва количества тротила. И, кроме того, использование данного способа ликвидации ледяных заторов не требует больших трудозатрат: устройством может управлять один человек с передвижной станции, находящейся в надежном укрытии. Таким образом, очевидна экономическая эффективность рассматриваемого способа.

Важным достоинством взрыва газоздушных смесей, по сравнению со взрывом конденсированных взрывчатых веществ, является отсутствие губительного влияния на окружающую фауну реки [8], следовательно, рассматриваемый способ ликвидации ледяных заторов экологически безопасен.

Данный способ ликвидации ледяных заторов также можно использовать и для проведения предупредительных мероприятий по разрушению льда в местах вероятного образования ледяных заторов до начала ледохода.

Близкие по технической сущности способы разрушения ранее исследовались в работах [3, 4, 6].

Математическая модель процесса

На рис. 2 представлена формализованная расчетная схема процесса с учетом осевой симметрии, на котором: I – ледяной покров, II – конструкция устройства, III – вода, IV – газоздушная смесь. Для описания процесса разрушения воспользуемся математической моделью, опубликованной в работе [3]. Эта модель основывается на следующих предположениях о механическом поведении компонентов системы: твердые тела (лед, конструкция устройства) принимаются упругими несжимаемыми изотропными, а вода – ньютоновской вязкой несжимаемой жидкостью. Деформации в упругих телах принимались малыми. Кроме того, для ледяного покрова учитывалась неоднородность механических свойств по толщине.

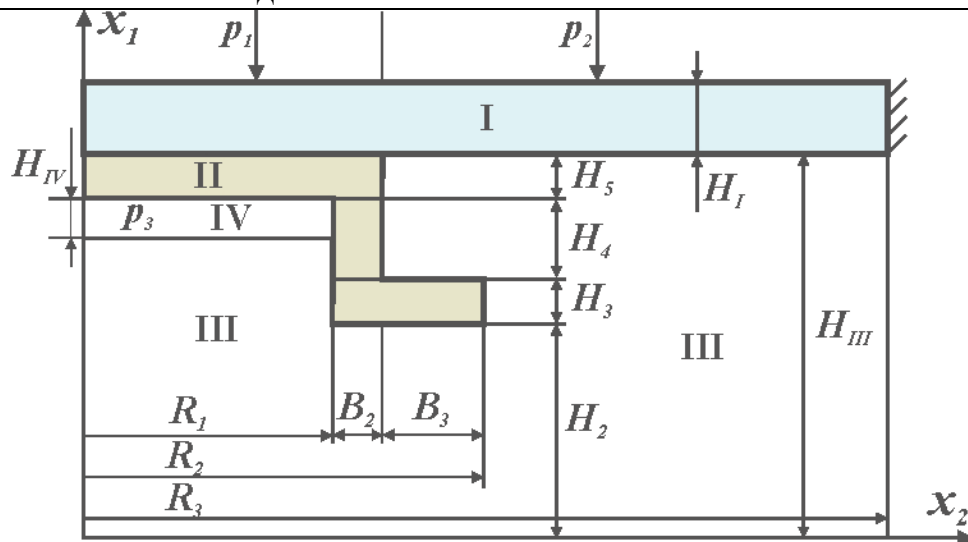


Рис. 2. Расчетная схема процесса

Система уравнений в едином виде для компонент системы I-III в связанной постановке выглядит следующим образом:

$$\sigma_{ij,j} + F_i^t = \rho_t \left(\dot{v}_i + v_k \frac{\partial v_i}{\partial x_k} \right), \quad t = I, II, III;$$

$$\sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij} = 2\lambda_t C_{ij}^t, \quad \begin{cases} \lambda_t = G_t(x_1); & C_{ij}^t = \varepsilon_{ij}; & t = I, II; \\ \lambda_t = \mu; & C_{ij}^t = \xi_{ij}; & t = III; \end{cases} \quad (1)$$

$$v_{i,i} = 0,$$

где $[\sigma_{ij}]$ – тензор напряжений; F_i^t – проекция удельной объемной силы на координатные оси x_i , $i = 1, 2, 3$; t – идентификатор области; ρ_t – плотность материала; v_i – проекция скоростей перемещений на координатные оси x_i , $i = 1, 2, 3$; τ – время; σ – гидростатическое напряжение; δ_{ij} – символ Кронекера; G_t – модуль сдвига в области t ; μ – коэффициент динамической вязкости; $[\varepsilon_{ij}]$ – тензор деформаций; в уравнениях имеет место суммирование по повторяющимся индексам.

Система уравнений (1) для простоты записана в декартовых координатах, однако, при решении, разумеется, используется цилиндрическая система координат с учетом осевой симметрии.

Для малых деформаций справедливо равенство

$$\xi_{ij} = \frac{d\varepsilon_{ij}}{d\tau},$$

где ξ_{ij} – компоненты тензора скоростей деформаций сдвига $\xi_{ij} = 0,5(v_{i,j} + v_{j,i})$.

Отсюда

$$\varepsilon_{ij} = \int \xi_{ij} d\tau \cong \sum_m \xi_{ij} d\tau_m,$$

где m – номер временного шага.

Газовоздушная подушка (IV) моделировалась путем задания давления p_3 на поверхностях, принадлежащих области IV. Длительность процесса находилась по формуле

$$\tau_c = H_{IV} / v_c,$$

где v_c – скорость горения.

В ходе процесса давление p_3 изменялось от 0 до конечного давления p_3 по линейному закону. В качестве газозвушной смеси принимался природный газ, а давление p_3 и скорость горения v_2 задавались с помощью данных [7].

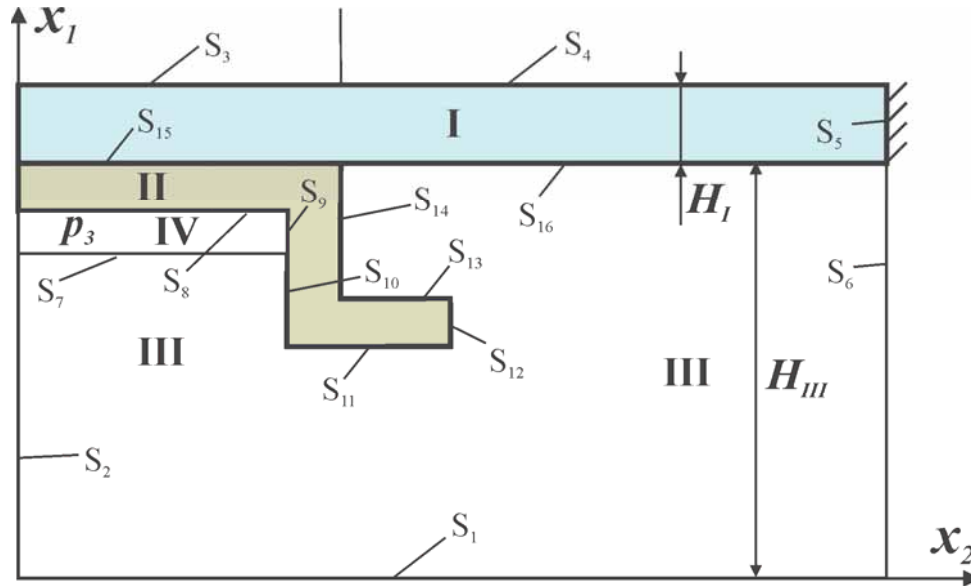


Рис. 3. Схема постановки граничных условий

Граничные условия (рис. 3) с учетом осевой симметрии имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{11}|_{S_3} &= -p_1; \quad \sigma_{11}|_{S_4} = -p_2; \\
 v_1|_{S_1} &= 0; \quad v_2|_{S_2} = 0; \quad v_2|_{S_5} = 0; \\
 \sigma_{22}|_{S_7} &= -p_3; \quad \sigma_{11}|_{S_i} = -p_3, \quad i = 7, 8; \\
 \sigma_{22}|_{S_6} &= -p_1 - \gamma_1 H_1 - \gamma_3 h; \quad (0 \leq h \leq H_{III}); \\
 \sigma_{21}|_{S_i} &= 0, \quad (i = 2, 5, 9, 10, 12, 14); \quad \sigma_{12}|_{S_i} = 0, \quad (i = 1, 3, 4, 7, 8, 11, 13); \\
 \sigma_{21}|_{S_5} &= \psi \sigma_s \frac{v_{ck}}{|v_u|},
 \end{aligned} \tag{2}$$

где ψ – коэффициент трения (принималось $\psi = 1000$); σ_s – условный предел текучести льда; v_{ck} – скорость скольжения области I относительно основы: $v_{ck} = v_1|_{S_{18}} - v_1^*$, v_1^* – скорость основы, $v_1^* = 0$; $|v_u|$ – нормирующая скорость.

Результаты численных расчетов

Для решения сформулированной системы уравнений (1) с учетом граничных условий (2) использовался алгоритм [4], основанный на апробированном численном методе [2]. Данный метод использует конечно-разностное представление системы уравнений (1) для элемента в произвольной ортогональной системе координат.

Задача решалась в цилиндрической системе координат с учетом осевой симметрии по шагам времени $\Delta\tau_m$, $\tau = \sum_m \Delta\tau_m$.

Результаты расчетов

При решении задачи использовался профиль модуля сдвига пресноводного льда, изображенный на рис. 4, где T_{min} – температура верхней поверхности ледяного покрова. Для

получения данного профиля использовалась эмпирическая зависимость модуля сдвига льда от температуры [10], профиль температуры для простоты принимался линейным от температуры плавления на нижней поверхности ледяного покрова до T_{\min} на верхней поверхности.

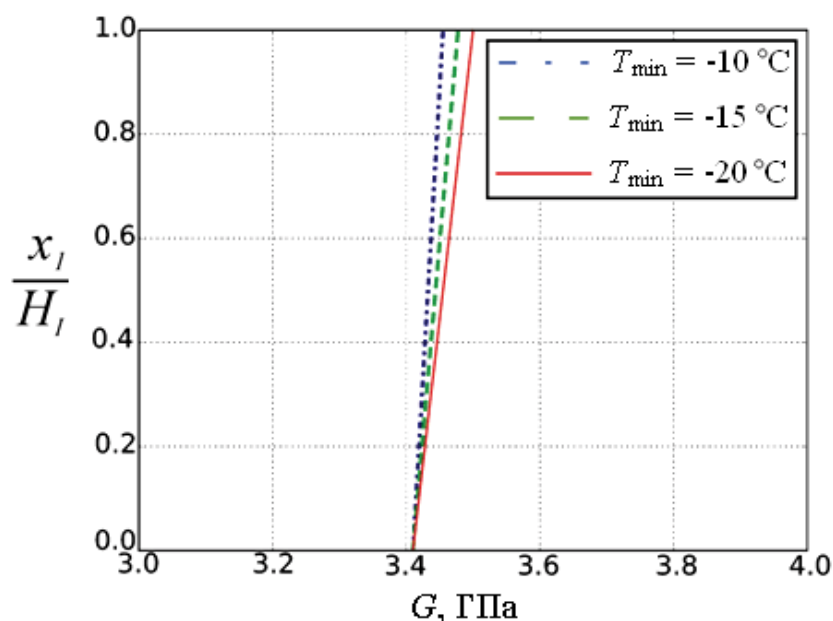


Рис. 4. Профиль модуля сдвига пресноводного льда при $T_{\min} = -10, -15, -20 \text{ } ^\circ\text{C}$

Указанная зависимость имеет вид

$$G_T = G_0 + e(T_m - T),$$

где $G_0 = 3,41 \text{ ГПа}$ – модуль сдвига пресноводного льда при температуре плавления; $e = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ ГПа/}^\circ\text{C}$.

Предел прочности пресноводного льда в диапазоне температур $[-20 \dots -10] \text{ } ^\circ\text{C}$ на растяжение $\sigma_t^f = 1,4 \text{ МПа}$, на сжатие $\sigma_c^f = 5 \text{ МПа}$ [11]. В качестве материала цилиндров принималась сталь марки Ст.3, для которой [1] $G_2 = 8 \cdot 10^4 \text{ МПа}$. Коэффициент динамической вязкости воды по данным [9] $\mu = 1,7608 \text{ мПа} \cdot \text{с}$. В качестве газовой смеси принимался природный газ, для которого по данным [7] конечное давление $p_3 = 0,7 \text{ МПа}$.

В ходе численных расчетов геометрические параметры варьировались следующим образом: радиус цилиндра R_1 : 1, 2, 3, 4 м, толщина газовой подушки H_4 : 2, 3, 4, 5, 6 см, толщина льда H_5 : 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 м.

Результаты проведенных расчетов приведены на рис. 5 в виде эпюр нормальных напряжений σ_{22} при $\tau = 0,04 \text{ с}$. При этом геометрические параметры принимали следующие значения: $R_1 = 2,5 \text{ м}$, $H_{IV} = 4 \text{ см}$, $H_1 = 1 \text{ м}$, $H_2 = 20 \text{ м}$, $R_3 = 30 \text{ м}$, $H_3 = H_5 = B_2 = 0,1 \text{ м}$, $H_4 = B_3 = 1 \text{ м}$.

Видим (рис. 5), что в ходе процесса ледяной покров изгибается под действием цилиндра III; нижние слои льда сжимаются, а верхние растягиваются. Используя принятый критерий, можно сделать вывод, что при данных значениях геометрических параметров разрушение происходит только в верхних слоях, в которых растягивающие напряжения достигают предела прочности σ_t^f .

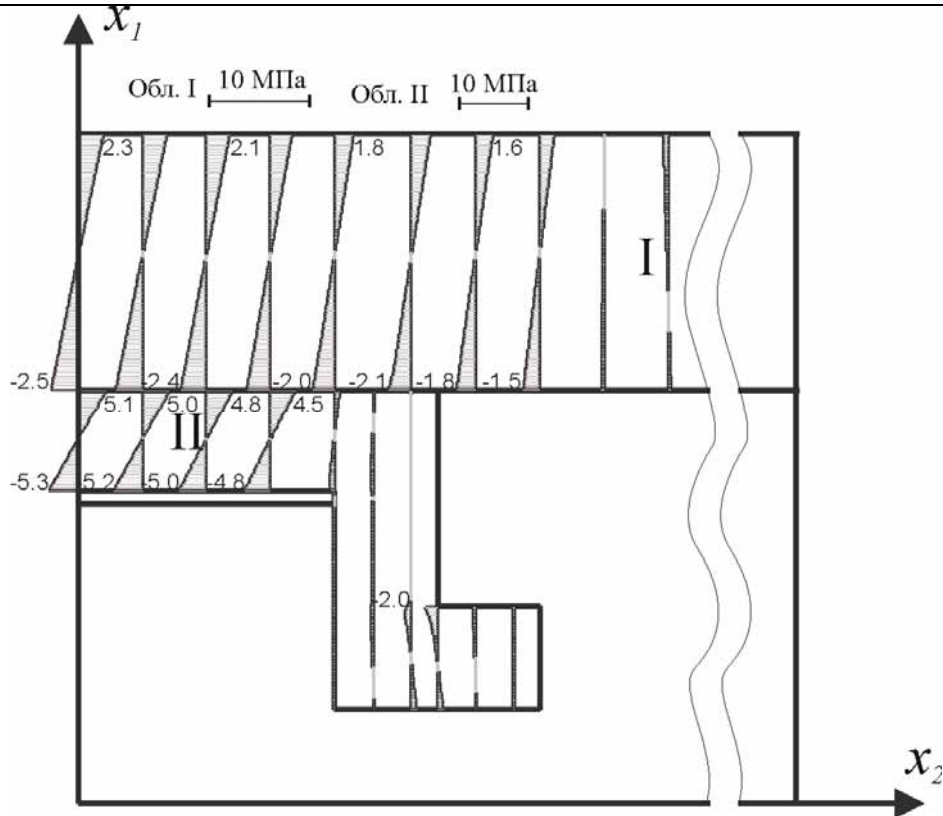


Рис. 5. Эпюры напряжений σ_{22}

На рис. 6 – 8 изображены поля скоростей и давления в воде в окрестности устройства на шагах времени $\tau = 0,01$ с, $0,025$ с, $0,04$ с. Видим, что процесс горения в цилиндре приводит к значительному повышению давления воды в непосредственной близости от газоздущной подушки. Скорости движения воды достигают наибольших значений в цилиндре и на выходе из него.

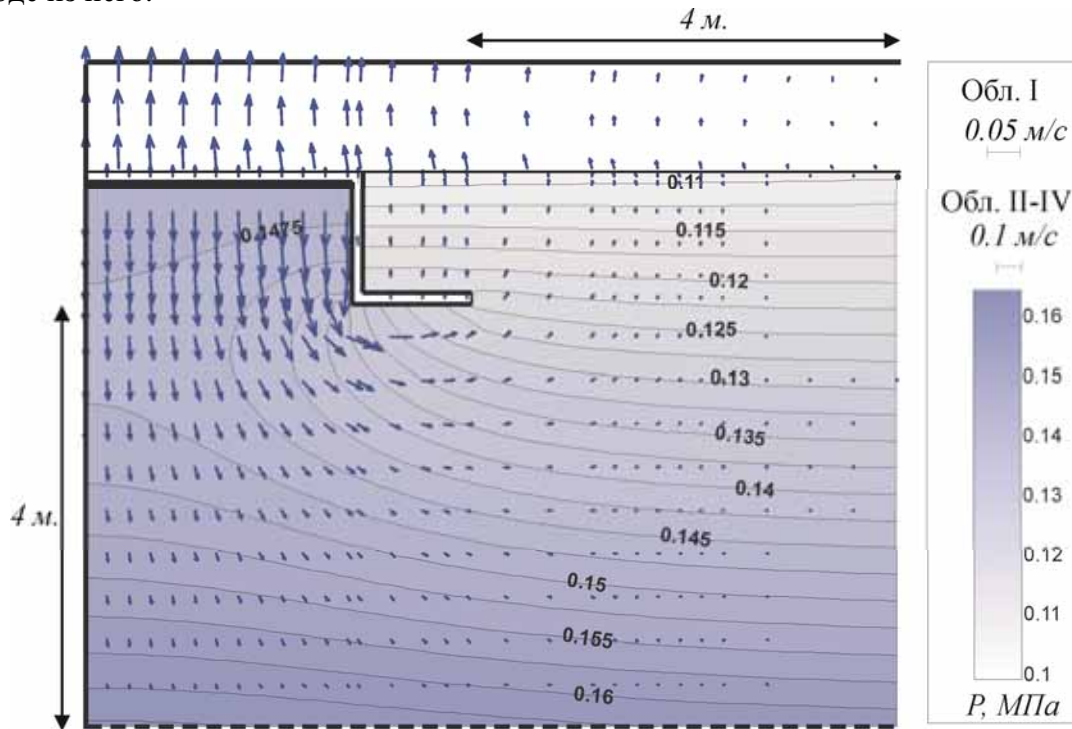


Рис. 6. Поля скоростей и давления при $\tau = 0,01$ с

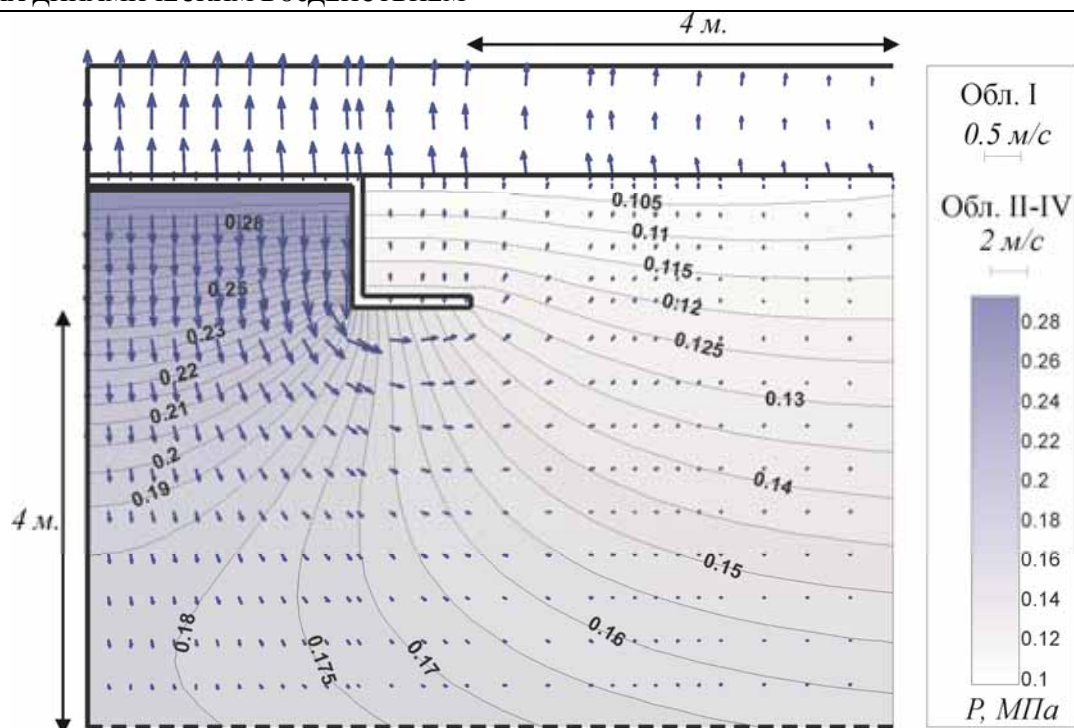


Рис. 7. Поля скоростей и давления при $\tau = 0,025$ с

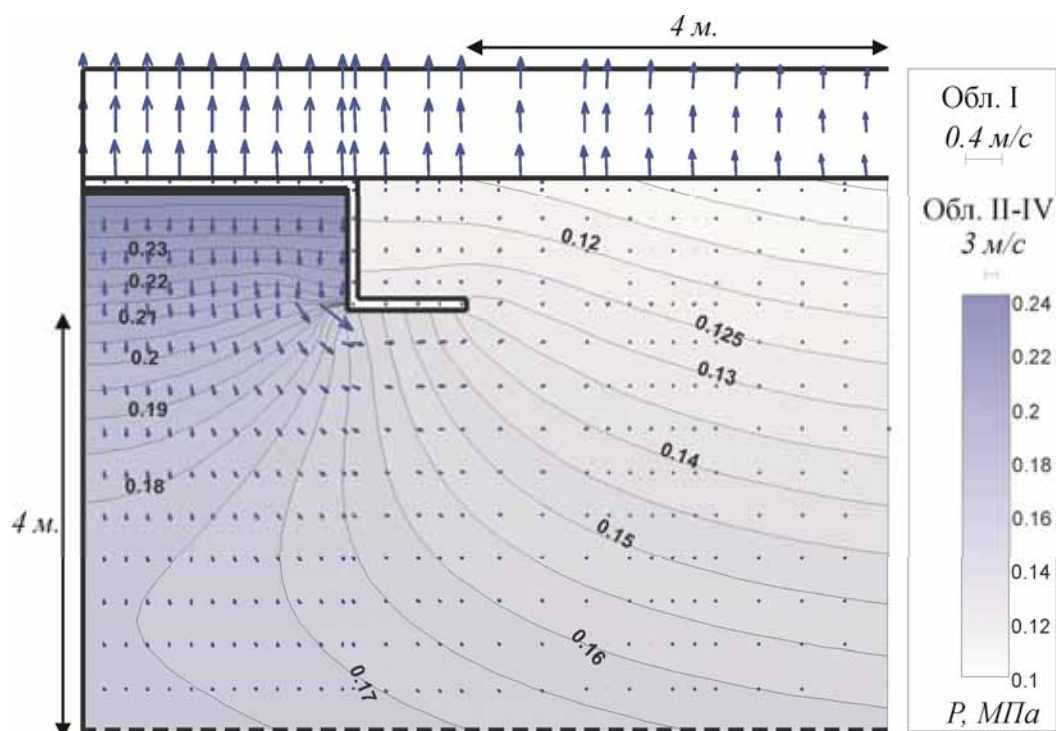


Рис. 8. Поля скоростей и давления при $\tau = 0,04$ с

Результаты проведенных расчетов обобщены в таблице, в которой приведена зависимость максимальной толщины разрушаемого льда от радиуса цилиндра R_1 и толщины газозадушной подушки H_4 . При этом под разрушением принимается ситуация, при которой напряжения σ_{22} превышают соответствующие предельные значения как в нижних, так и верхних слоях в радиусе $\geq R_1$. Видим, что устройство с радиусом цилиндра 4 м способно разрушить метровый лед. Однако сравнивая полученные результаты с другими способами раз-



рушения [3, 4, 7], можно сделать вывод, что рассматриваемый в данной работе способ обладает наименьшей ледоразрушающей способностью. Это объясняется в первую очередь падением давления газовой смеси в области IV в ходе процесса разрушения.

Зависимость максимальной толщины разрушаемого льда H_{\max} от радиуса цилиндра R_1 , толщины газовой подушки H_4

| R_1 , м | H_4 , м | H_{\max} , М | R_1 , м | H_4 , м | H_{\max} , М |
|-----------|-----------|----------------|-----------|-----------|----------------|
| 1 | 0,02 | < 0,5 | 3 | 0,02 | 0,50 |
| 1 | 0,03 | < 0,5 | 3 | 0,03 | 0,50 |
| 1 | 0,04 | < 0,5 | 3 | 0,04 | 0,75 |
| 1 | 0,05 | < 0,5 | 3 | 0,05 | 0,75 |
| 1 | 0,06 | < 0,5 | 3 | 0,06 | 0,75 |
| 2 | 0,02 | < 0,5 | 4 | 0,02 | 0,75 |
| 2 | 0,03 | < 0,5 | 4 | 0,03 | 0,75 |
| 2 | 0,04 | 0,5 | 4 | 0,04 | 0,75 |
| 2 | 0,05 | 0,75 | 4 | 0,05 | 1,0- |
| 2 | 0,06 | 0,75 | 4 | 0,06 | 1,0- |

Говоря о напряжениях в конструкции, следует отметить, что они далеки от предела текучести стали [1] и, кроме того, значительно меньше напряжений, возникающих в ранее исследуемых устройствах [3, 4, 6].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (код проекта 11-01-98500-р_восток_a)

ЛИТЕРАТУРА

1. Кроха, В. А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации: справ. / В. А. Кроха. – М.: Машиностроение, 1980. – 157 с.
2. Математическое моделирование сложных технологических процессов / В. И. Одинокоев [и др.] – М.: Наука, 2008. – 176 с.
3. Одинокоев, В. И. Моделирование процесса разрушения ледяных заторов / В. И. Одинокоев, А. Н. Прокудин // Прикладная механика и техническая физика. – 2010. – Т. 51, № 1. – С. 110-116.
4. Одинокоев, В. И. Численное моделирование процесса деформации элементов конструкции в многокомпонентных системах под действием динамической нагрузки / В. И. Одинокоев, А. Н. Прокудин // Вычислительная механика сплошных сред. – 2010. – Т. 3, № 4. – С. 80-95.
5. Пат. 2398706 Российская Федерация, МПК В63В 35/08, Е02В 15/02 Устройство для ликвидации заторообразования / В. И. Одинокоев, А. Н. Прокудин, заявл. 06.03.2009; опубл. 10.09.2010, Бюл. № 25. – 6 с.
6. Прокудин, А. Н. Численное моделирование работы нового устройства для разрушения ледяного покрова / А. Н. Прокудин // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № II-1(6) – С. 34-43.
7. Равич, М. Б. Беспламенное поверхностное горение / М. Б. Равич. – М.–Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1949. – 354 с.
8. Физика взрыва. В 2 т. Т. 1 / под ред. Л. П. Орленко. – М.: Физматлит, 2002. – 832 с.
9. Kingham, D. James; Adams, W.A. and McGuire, M.J. Viscosity measurements of water in region of its maximum density. Journal of Chemical & Engineering Data, 1974, Vol 19, No 1, pp 1–3.
10. Sinha N. K. Elasticity of natural types of Polycrystalline Ice // Cold regions science and technology. – 1989. – Vol. 17 – P. 127-135
11. Timco G.W., Weeks W.F. A review of the engineering properties of sea ice // Cold regions science and technology. – 2010. – Vol. 60 – P. 107-129

Тырсин А.Н., Макарова Т.А.
ИДЕНТИФИКАЦИЯ СТРУКТУРНЫХ ЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ

Тырсин А. Н., Макарова Т. А.
Tyrsin A.N., Makarova T.A.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ СТРУКТУРНЫХ ЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ¹

IDENTIFICATION OF STRUCTURAL LINEAR EQUATIONS



Тырсин Александр Николаевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Научно-инженерного центра «Надежность и ресурс больших систем и машин» УрО РАН (Россия, Екатеринбург); 620049, г. Екатеринбург, ул. Студенческая, 54-а; +79221007452. E-mail: at2001@yandex.ru.

Mr. Alexander N. Tyrsin – Doctor of Engineering, Chief Researcher, Scientific and Engineering Centre "Reliability and Lifecycle of Large Systems and Machines", the Urals Branch of Russian Academy of Sciences, city of Yekaterinburg, Russia



Макарова Тамара Александровна – аспирант Челябинского государственного университета (Россия, Челябинск); 620049, г. Екатеринбург, ул. Студенческая, 54-а; +79221007452. E-mail: at2001@yandex.ru.

Ms. Tamara A. Makarova – PhD Candidate, City of Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

Аннотация. Рассмотрена задача построения структурных линейных уравнений при наличии случайных погрешностей во входных и выходных переменных. Предложены статистические тесты для обнаружения наличия погрешностей измерений входных переменных, которые не требуют предварительной состоятельной оценки коэффициентов в предположении наличия ошибок. Приведены примеры исследования теста с помощью статистического моделирования методом Монте-Карло.

Summary. The problem of estimation of structural linear equations is considered in the presence of casual errors in input/output variables. Statistical tests for detection of the presence of errors of entrance-variable measurements are suggested. The tests do not require a consistent estimation of factors under assumption of the presence of mistakes. Examples of test analysis by means of statistical modeling by the Monte-Carlo method are provided.

Ключевые слова: структурное линейное уравнение, регрессионная модель, оценка параметра, статистическое моделирование.

Key words: structural linear equation, regression model, estimator of parameter, statistical modeling.

УДК 517.8:681.5

Введение

Рассмотрим задачу построения линейных регрессионных моделей при наличии погрешностей во входных и выходных переменных. Пусть случайные величины y, x_1, \dots, x_k связаны структурным линейным уравнением

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 10-01-96013-р Урала.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon, \quad (1)$$

где случайная величина ε представляет собой ошибку, которая может быть связана как с неточностью измерения фактора y , так и с неточностью спецификации самой модели; $\beta_i, i = 0, \dots, k$ – некоторые постоянные коэффициенты.

Предположим, что вместо точных значений $x_j, j = 1, \dots, k$ известны значения $u_j, j = 1, \dots, k$:

$$u_j = x_j + \xi_j, \quad (2)$$

где ξ_j – ошибка измерения x_j , случайная величина с нулевым математическим ожиданием.

Идентификация коэффициентов модели (1)-(2) на основе результатов измерений $y_i, u_{1i}, \dots, u_{ki}, i = 1, \dots, n$ представляет собой известную задачу регрессионного анализа данных с погрешностями во входных и выходных переменных [3; 5]. Известно, что применение стандартных методов (метод наименьших квадратов (МНК), взвешенный метод наименьших квадратов (ВМНК), метод наименьших модулей (МНМ)) приводит к смещенным и несостоятельным оценкам коэффициентов [3; 5], следовательно, к ложным выводам и неправильным решениям.

На сегодняшний день существующие методы решения задачи (1)-(2) [2; 3; 6; 7; 12] достаточно сложны, в большинстве случаев они используют некоторую априорную информацию или предположения об исходных данных, требуют серьезных вычислительных затрат или проведения дополнительных исследований и вычислений. В данной ситуации актуальной проблемой является проверка необходимости применения данных процедур, другими словами, проверка наличия ошибок измерения регрессоров в статистических данных согласно модели (1)-(2).

Следует отметить, что применение специальных методов для задач, в которых отсутствуют ошибки независимых переменных, как правило, приводят к менее эффективным оценкам по сравнению с применением стандартных подходов [12, 80].

Для проверки статистических данных на наличие ошибок измерения регрессоров в модели (1)-(2) можно использовать тест Хаусмана [4; 13]. Данный тест основан на сравнении некоторой стандартной оценки, которая является несмещенной и состоятельной только в случае отсутствия ошибок, и некоторой оценки, которая является несмещенной и состоятельной и при наличии ошибок, и при их отсутствии. В данном случае расхождение между этими оценками будет свидетельствовать о наличии ошибки в независимых переменных. Известно несколько вариантов тестов, основанных на использовании метода инструментальных переменных [10; 12].

Однако описанный подход требует решение задачи (1)-(2), что может быть достаточно затруднительным и чего хотелось бы как раз избежать с помощью применения подобного теста.

В статье предложен статистический тест для проверки наличия ошибок измерения регрессоров в модели (1)-(2), который не требует предварительной состоятельной оценки коэффициентов в предположении наличия ошибок.

Вначале рассмотрим случай парной регрессии, далее полученные результаты обобщим для случая множественной регрессии.

Постановка задачи

Рассмотрим линейную регрессионную модель:

$$y_i = \beta_0 + \beta x_i + \varepsilon_i, \quad u_i = x_i + \xi_i, \quad (3)$$

где $i = 1, \dots, n$; коэффициенты β_0, β – постоянные величины, причем $\beta \neq 0$. Будем предполагать, что для модели (3) выполнены следующие предположения:

$$x_i, \varepsilon_i, \xi_i, i = 1, \dots, n \text{ – независимые реализации случайных величин } X, \varepsilon, \xi; \quad (4)$$

$$E[\xi_i] = E[\varepsilon_i] = 0, \quad D[\xi_i] = \sigma_\xi^2, D[\varepsilon_i] = \sigma_\varepsilon^2, \forall i; \quad (5)$$

$$\text{cov}(\xi_i, \varepsilon_i) = \text{cov}(y_i, \varepsilon_i) = \text{cov}(y_i, \xi_i) = \text{cov}(x_i, \xi_i) = \text{cov}(x_i, \varepsilon_i) = 0, \forall i; \quad (6)$$

для случайных величин x и ξ существуют моменты:

$$\sigma_x^2 = E[(x - Ex)^2], \quad \sigma_\xi^2 = E[(\xi - E\xi)^2], \quad (7)$$

$$\mu_4(x) = E[(x - Ex)^4], \quad \mu_4(\xi) = E[(\xi - E\xi)^4]. \quad (8)$$

Из (4) следует, что $\forall i \neq k \text{ cov}(\xi_i, \xi_k) = \text{cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_k) = 0$.

Требуется по набору наблюдений $\{y_i, u_i\}, i = 1, \dots, n$ при справедливости (3)-(8) сделать вывод о наличии или отсутствии погрешности измерения независимой переменной, другими словами, проверить гипотезу $H_0: \{\sigma_\xi^2 = 0\}$ против альтернативной гипотезы $H_1: \{\sigma_\xi^2 > 0\}$.

Построение теста для МНК-оценок

Регрессионное уравнение (3) представим в виде:

$$y_i = \beta_0 + \beta u_i + v_i, \quad i = 1, \dots, n. \quad (9)$$

Пусть b_1 и b_2 – соответственно МНК- и ВМНК-оценки коэффициента β в уравнении (9):

$$b_1 = \sum_{i=1}^n u_i' y_i' \left[\sum_{i=1}^n (u_i')^2 \right]^{-1} = \beta + \sum_{i=1}^n u_i' v_i \left[\sum_{i=1}^n (u_i')^2 \right]^{-1}, \quad (10)$$

$$b_2 = \sum_{i=1}^n (u_i')^2 y_i' \left[\sum_{i=1}^n (u_i')^4 \right]^{-1} = \beta + \sum_{i=1}^n (u_i')^2 v_i \left[\sum_{i=1}^n (u_i')^4 \right]^{-1}, \quad (11)$$

где $y_i' = y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$, $u_i' = u_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i$.

При справедливости гипотезы $H_0: u_i = x_i$ и $v_i = \varepsilon_i$, $i = 1, \dots, n$. Согласно (6), математическое ожидание второго слагаемого в выражении (10) и (11) равно нулю, что означает несмещенность оценок b_1 и b_2 : $E[b_1] = E[b_2] = \beta$. При справедливости альтернативной гипотезы $H_1: v_i = \varepsilon_i - \beta \xi_i$, оценки b_1 и b_2 являются смещенными [2; 6]:

$$E[b_1] = \beta \frac{\sigma_x^2}{\sigma_x^2 + \sigma_\xi^2} = \beta \left(1 - \frac{\sigma_\xi^2}{\sigma_u^2} \right), \quad (12)$$

$$E[b_2] = \beta \frac{\mu_4(u) - 3\sigma_x^2 \sigma_\xi^2 - \gamma_\xi \sigma_\xi^4}{\mu_4(u)}, \quad (13)$$

где γ_ξ – коэффициент эксцесса случайной величины ξ , $\gamma_\xi = \frac{\mu_4(\xi)}{\sigma_\xi^4}$.

Пусть $A = \frac{\sigma_\xi^2}{\sigma_u^2}$ – доля дисперсии ошибки ξ в общей дисперсии наблюдаемой переменной u , $0 \leq A \leq 1$, в случае отсутствия ошибок в регрессорах (гипотеза H_0) $A = 0$. Из (12) и (13) имеем:

$$E[b_1] = \beta(1 - A), \quad E[b_2] = \beta \left[1 - \left(\frac{3}{\gamma_u} A + \frac{\gamma_\xi - 3}{\gamma_u} A^2 \right) \right]. \quad (14)$$

Если $A = 0$, то $E[b_1] = E[b_2]$, обратное верно не во всех случаях, рассмотрим лемму.

Лемма. Пусть $E[b_1] = E[b_2]$, тогда справедливо одно из условий:

- 1) $A = 0$;
- 2) $\gamma_\xi = \gamma_u = 3$;
- 3) $A = \frac{\gamma_u - 3}{\gamma_\xi - 3}$, $\gamma_\xi \neq 3$.

Доказательство.

Приравняв $E[b_1] = E[b_2]$, из (14) получим уравнение:

$$\frac{3 - \gamma_u}{\gamma_u} A + \frac{\gamma_\xi - 3}{\gamma_u} A^2 = 0. \quad (15)$$

Найдем его решения. Непосредственно подстановкой $A = 0$ и $\gamma_\xi = \gamma_u = 3$ в (15) получаем верное тождество.

Пусть теперь $A \neq 0$ и $\gamma_\xi \neq 3$. Тогда, преобразовав уравнение (15) к виду:

$$3 - \gamma_u + (\gamma_\xi - 3)A = 0,$$

получим

$$A = \frac{\gamma_u - 3}{\gamma_\xi - 3}.$$

Следует отметить, что решение $A = \frac{\gamma_u - 3}{\gamma_\xi - 3}$ можно легко отличить от решения $\gamma_\xi = \gamma_u = 3$ с помощью добавления аддитивной гауссовой погрешности.

Теорема 1. При справедливости гипотезы H_0 в условиях модели (3)-(8)

$$h = \frac{(b_2 - b_1)^2}{\sigma_v^2} \left[E \left\{ \frac{\sum u_i^6}{(\sum u_i^4)^2} - \frac{1}{\sum u_i^2} \right\} \right]^{-1} \sim \chi^2(1) \text{ ас.}, \quad (16)$$

где b_1 и b_2 – соответственно МНК- и ВМНК-оценки коэффициента β в уравнении(9), вычисленные по формулам (10), (11), σ_v^2 – дисперсия ошибки v в уравнении (10).

Доказательство.

Предположим, что гипотеза H_0 верна. В данном случае

$$E[b_1] = E[b_2] = \beta, \quad (17)$$

причем оценки b_1 и b_2 являются асимптотически нормальными [12, 67], таким образом

$$\frac{(b_1 - b_2)^2}{D[b_1 - b_2]} \sim \chi^2(1) \text{ ас.}, \quad (18)$$

где $D[b_1 - b_2]$ – дисперсия разности оценок.

Дисперсии $D[b_1]$ и $D[b_2]$ вычисляются по формулам [12]

$$V[b_1] = \sigma_v^2 E \left\{ \frac{1}{\sum u_i^2} \right\}, V[b_2] = \sigma_v^2 E \left\{ \frac{\sum u_i^6}{(\sum u_i^4)^2} \right\}. \quad (19)$$

Дисперсия разности оценок имеет вид:

$$D[b_1 - b_2] = D[b_1] + D[b_2] - 2\text{cov}(b_1, b_2). \quad (20)$$

Из (10), (11) и (17) имеем:

$$\text{cov}(b_1, b_2) = E[(b_2 - \beta)(b_1 - \beta)] = E \left[\frac{\sum u_i' v_i}{\sum u_i^2} \frac{\sum u_i^3 v_i}{\sum u_i^4} \right].$$

Поскольку $\text{cov}(v_i, v_j) = \text{cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0$ при $i \neq j$, то

$$\text{cov}(b_1, b_2) = E \left[\frac{1}{\sum u_i^2} \frac{\sum u_i^4 y_i}{\sum u_i^4} \right] = \sigma_v^2 E \left[\frac{1}{\sum u_i^2} \right]. \quad (21)$$

Сравнивая (19) и (20), получаем $\text{cov}(b_1, b_2) = D[b_1]$, тогда из (19)-(21) имеем:

$$V[b_1 - b_2] = V[b_2] - V[b_1] = \sigma_v^2 E \left\{ \frac{\sum u_i^6}{(\sum u_i^4)^2} - \frac{1}{\sum u_i^2} \right\}. \quad (22)$$

Из (18) и (22) получаем, что асимптотически статистика h имеет распределение $\chi^2(1)$.

Моделирование

Исследование работоспособности предложенного метода было проведено с помощью моделирования методом Монте-Карло нескольких задач с различными законами распределения независимой переменной X .

Пусть случайные ошибки ε и ξ имеют нормальное распределение: $\varepsilon \sim N(0, 0.3)$, $\xi \sim N(0, \sigma_\xi^2)$, теоретические коэффициенты регрессии равны: $\beta_0 = 0.5$, $\beta_1 = 1.0$. Уровень значимости зададим $\alpha = 0.05$. Было рассмотрено несколько вариантов распределения независимой переменной X : экспоненциальное (Exp), логнормальное (LogNorm), Лапласа (Laplas). Для каждого типа распределения рассмотрены задачи с различным соотношением дисперсий σ_ξ^2 и σ_u^2 : 0; 0.05; 0.1; 0.2; 0.3; 0.4.

В табл. 1 представлены оценки мощности теста для рассмотренных вариантов задач, согласно (14) величина A соответствует смещению МНК-оценки. По результатам моделирования мощность теста увеличивается с ростом смещения МНК-оценок.

Таблица 1

Оценка мощности теста для различных законов распределения случайной величины X и различных соотношений дисперсий, оценки получены методом Монте-Карло, количество испытаний – 2000

| $n = 500$ | | | | $n = 1000$ | | | |
|-----------|---------------|---------|--------|------------|---------------|---------|--------|
| A | Распределение | | | A | Распределение | | |
| | Exp | LogNorm | Laplas | | Exp | LogNorm | Laplas |
| 0 | 0.04 | 0.05 | 0.05 | 0 | 0.05 | 0.05 | 0.05 |
| 0.05 | 0.16 | 0.60 | 0.22 | 0.05 | 0.26 | 0.78 | 0.35 |
| 0.1 | 0.44 | 0.96 | 0.51 | 0.1 | 0.71 | 1.00 | 0.76 |
| 0.2 | 0.85 | 1.00 | 0.85 | 0.2 | 0.98 | 1.00 | 0.98 |
| 0.3 | 0.96 | 1.00 | 0.94 | 0.3 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 0.4 | 0.98 | 1.00 | 0.94 | 0.4 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |

Множественная линейная регрессия с ошибками в переменных

Рассмотрим линейную модель множественной регрессии:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i^1 + \dots + \beta_k x_i^k + \varepsilon, \quad u_i^j = x_i^j + \xi_i^j, \quad (23)$$

где $j = 1, \dots, k, i = 1, \dots, n, \beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ – постоянные коэффициенты, причем $\beta_j \neq 0, j = 1, \dots, k$.

Для модели (23) будем предполагать, что выполнены следующие условия:

- 1) $x_i^j, \varepsilon_i, \xi_i^j, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, k}$ – независимые реализации случайных величин;
- 2) $E[\xi_i^j] = E[\varepsilon_i] = 0, D[\xi_i^j] = \sigma_{\xi^j}^2, D[\varepsilon_i] = \sigma_\varepsilon^2, \forall i, j$;
- 3) $\text{cov}(\xi_i^j, \varepsilon_i) = \text{cov}(y_i, \varepsilon_i) = \text{cov}(y_i, \xi_i^j) = \text{cov}(x_i^j, \xi_i^j) = \text{cov}(x_i^j, \varepsilon_i) = 0, \forall i, j$;
- 4) для случайных величин x^j и ξ^j существуют моменты:

$$\sigma_{x^j}^2 = E[(x^j - Ex^j)^2], \quad \sigma_{\xi^j}^2 = E[(\xi^j - E\xi^j)^2],$$

$$\mu_4(x^j) = E[(x^j - Ex^j)^4], \quad \mu_4(\xi^j) = E[(\xi^j - E\xi^j)^4].$$

Из независимости реализаций случайных величин $x_i^j, \varepsilon_i, \xi_i^j$ следует, что $\text{cov}(\xi_i^j, \xi_i^l) = \text{cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_l) = 0$ для всех $i \neq l, j = 1, \dots, k$. Также будем рассматривать наблюдаемую случайную величину $u^j = x^j + \xi^j, \sigma_{u^j}^2 = \sigma_{x^j}^2 + \sigma_{\xi^j}^2$.

Требуется по набору наблюдений $\{y_i, u_i^1, \dots, u_i^k\}, i = 1, \dots, n$ при справедливости сформулированных выше условий для модели (23) сделать вывод о наличии или отсутствии погрешностей измерения независимой переменной x^l , другими словами, проверить гипотезу $H_0: \{\sigma_{\xi^l}^2 = 0\}$ против альтернативной гипотезы $H_1: \{\sigma_{\xi^l}^2 > 0\}, l = 1, \dots, k$.

Проверку сформулированной гипотезы H_0 будем проводить на основе сравнения двух оценок.

Рассмотрим регрессию в матричном виде:

$$Y = \beta U + \varepsilon,$$

$$Y = (y_1', \dots, y_n')^T, \varepsilon = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)^T,$$

$$U = \{u'_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, k}\},$$

$$y'_i = y_i - \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n y_m,$$

$$u^j_i = u_i^j - \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n u^j_m, j = 1, \dots, k.$$

Пусть $\mathbf{b}_1 = (b_1^1, \dots, b_1^k)$ и $\mathbf{b}_2 = (b_2^1, \dots, b_2^k)$ – векторы оценок коэффициентов, вычисленные по формулам:

$$\mathbf{b}_1^T = (U^T U)^{-1} U^T Y,$$

$$\mathbf{b}_2^T = (U^T W U)^{-1} U^T W Y,$$

где $W_{ij} = 0, i \neq j, W_{ii} = u_i^l, i = 1, \dots, k, j = 1, \dots, n$.

По аналогии с расчетами для парного случая можно показать, что

$$E[b_1^l] = \beta_l \frac{\sigma_{x^l}^2}{\sigma_{u^l}^2},$$

$$E[b_2^l] = \beta_l \frac{\mu_4(u^l) - 3\sigma_{x^l}^2 \sigma_{\xi^l}^2 - \gamma_{\xi^l} \sigma_{\xi^l}^4}{\mu_4(u^l)}.$$

Пусть $V_1 = V[\mathbf{b}_1]$ и $V_2 = V[\mathbf{b}_2]$ – ковариационные матрицы оценок \mathbf{b}_1 и \mathbf{b}_2 соответственно, тогда нетрудно показать, что

$$V[\mathbf{b}_2 - \mathbf{b}_1] = V_2 - V_1.$$

Действительно:

$$V[\mathbf{b}_2 - \mathbf{b}_1] = V_1 + V_2 - 2Cov(\mathbf{b}_2, \mathbf{b}_1) = V_1 + V_2 - 2E[(U^T W U)^{-1} U^T W v v^T U (U^T U)^{-1}] =$$

$$= \sigma_v^2 E[(U^T U)^{-1}] + V_2 - 2\sigma_v^2 E[(U^T U)^{-1}] = V_2 - V_1.$$

Таким образом, для дисперсии i -й компоненты справедливо:

$$V[b_2^l - b_1^l] = (V_2)_{ll} - (V_1)_{ll}.$$

Если для случайных величин ξ^l и u^l справедливы условия утверждения леммы, то совпадение оценок b_1^l и b_2^l означает отсутствие ошибки измерения независимой переменной

x^l в модели (23). В данном случае при справедливости гипотезы H_0 статистика $h = \frac{(b_2^l - b_1^l)^2}{(V_2)_{ll} - (V_1)_{ll}}$ асимптотически имеет распределение $\chi^2(1)$.

Построение теста для МНМ-оценок

Представим уравнение (3) в виде (9), где $v_i = \varepsilon_i - \beta \xi_i, i = 1, \dots, n$. Пусть b_3 и b_4 – оценки коэффициента β в модели (9), построенные следующим образом:

$$b_3 = \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^n |y'_i - b u'_i|,$$

$$b_4 = \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^n (u'_i)^2 |y'_i - b u'_i|,$$

где $y'_i = y_i - \operatorname{med}\{y_1, \dots, y_n\}, u'_i = u_i - \operatorname{med}\{u_1, \dots, u_n\}$.

При справедливости гипотезы H_0 мы имеем дело со стандартным случаем парной регрессии. Известно, что оценки b_3 и b_4 имеют асимптотически нормальное распределение [11]:

$$b_3 \sim N(\beta, D[b_3]), \quad b_4 \sim N(\beta, D[b_4]),$$

$$D[b_3] = \frac{1}{4f^2(0)} E \left[\frac{1}{\sum_{i=1}^n u_i^2} \right], \quad D[b_4] = \frac{1}{4f^2(0)} E \left[\frac{\sum_{i=1}^n u_i^6}{(\sum_{i=1}^n u_i^4)^2} \right],$$

где f – плотность распределения случайной величины v .

Разность оценок $b_4 - b_3$ при справедливости H_0 будет иметь асимптотически нормальное распределение с нулевым математическим ожиданием и дисперсией $D[b_4 - b_3]$. При справедливости H_0 , как и в случае МНК-оценок, оценки b_3 и b_4 являются смещенными, причем, как показано на рис. 1, величина смещения различна.

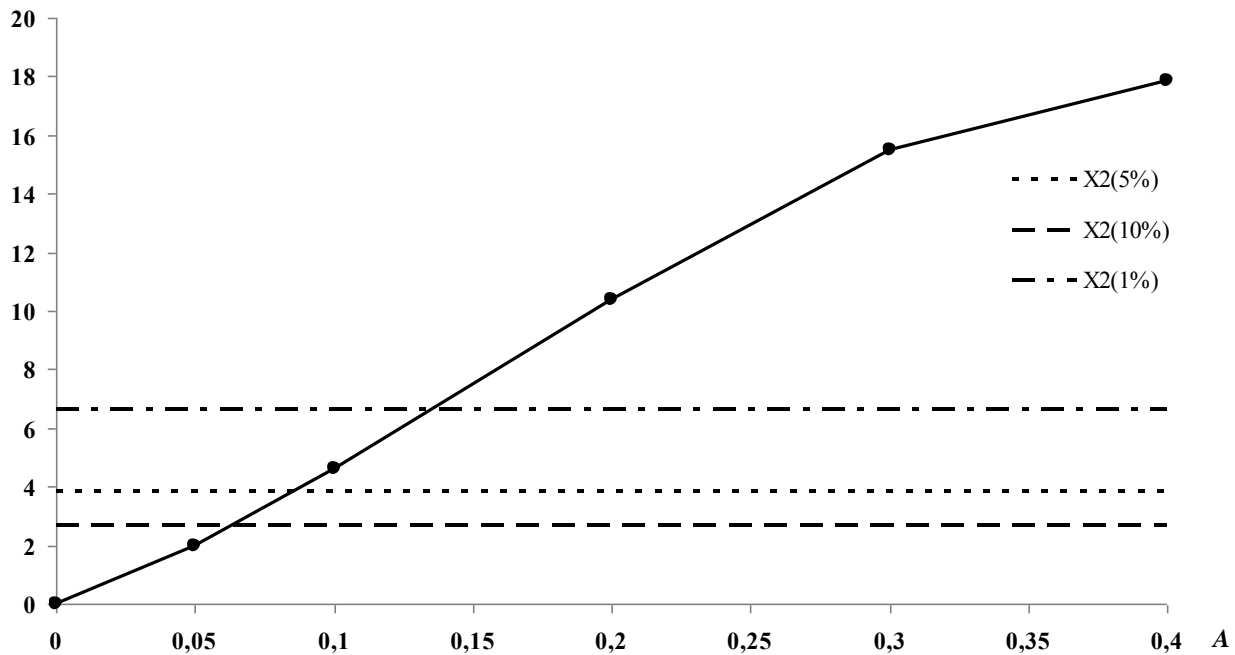


Рис. 1. Оценки величины $(b_4 - b_3)^2 / D[b_4 - b_3]$ для различных уровней ошибок A , полученные статистическим моделированием. Здесь $\varepsilon \sim N(0, 0.3)$, $\xi \sim N(0, \sigma_\xi^2)$, $X \sim Exp(1)$

Для оценки дисперсии разности оценок воспользуемся следующими асимптотическими разложениями [12]:

$$b_3 = \beta + \frac{1}{2f(0)B_n} \sum_{i=1}^n u_i \text{sign}(v_i) + o_p\left(\frac{1}{\sqrt{B_n}}\right),$$

$$b_4 = \beta + \frac{1}{2f(0)S_n} \sum_{i=1}^n u_i^3 \text{sign}(v_i) + o_p\left(\frac{1}{\sqrt{S_n}}\right),$$

$$D[b_4 - b_3] = D[b_4] + D[b_3] - 2\text{cov}(b_4, b_3),$$

$$\text{cov}(b_4, b_3) = E\left[\frac{1}{4f^2(0)B_n S_n} \sum_{i=1}^n u_i \text{sign}(v_i) \sum_{i=1}^n u_i^3 \text{sign}(v_i)\right] + o_p\left(\frac{1}{\sqrt{B_n}}\right),$$

где $B_n = \sum_{i=1}^n u_i^2$, $S_n = \sum_{i=1}^n u_i^4$.

Заметим, что

$$E[\text{sign}(v_i)\text{sign}(v_j)] = \begin{cases} 0, & i \neq j, \\ 1, & i = j. \end{cases}$$

Тогда

$$\text{cov}(b_4, b_3) = \frac{1}{4f^2(0)} E\left[\frac{1}{B_n S_n}\right] + o_p\left(\frac{1}{\sqrt{B_n}}\right).$$

Таким образом, для дисперсии разности можно использовать оценку:

$$D[b_4 - b_3] = D[b_4] - D[b_3].$$

Пример. Исследование зависимости потребления от уровня дохода

Согласно известной модели потребления Дж. Кейнса, доход Y является основным фактором, который определяет потребление C , и связь между данными величинами является линейной. М. Фридман, сформулировав гипотезу постоянного дохода [10], предложил рассматривать текущий доход как сумму двух компонентов: постоянного дохода Y^{cst} и времен-

ного дохода Y^{rnd} . Постоянный доход является той частью дохода, которая, согласно ожиданиям, сохранится в будущем. Иными словами, постоянный доход есть средний доход, а временный доход – случайное отклонение от этого среднего значения. Фридман считал, что потребление должно в основном зависеть именно от постоянного дохода.

На основе квартальных данных о динамике дохода и потребления в США в период с 1947 по 2011 гг. рассмотрим регрессионную модель следующего вида:

$$C_i = \beta_0 + \beta Y_i^{cst}, \quad Y_i = Y_i^{cst} + Y_i^{rnd}, \quad i = 1, \dots, n, n = 256.$$

Проведем тест на наличие случайной составляющей Y^{rnd} .

По формулам (10), (11) и (16) были рассчитаны оценки b_1, b_2 коэффициента β и значения статистики h : $b_1 = 8.36 \cdot 10^{-3}$, $b_2 = 7.8 \cdot 10^{-3}$, $h = 64.45$.

Для уровня значимости $\alpha = 0.05$ квантиль $\chi^2(1)$ распределения равен 3.84. Таким образом, гипотезу об отсутствии погрешности Y^{cst} следует отклонить.

Заключение

1. Для достаточно общих условий предложен статистический тест для обнаружения наличия погрешностей измерений входных переменных, который не требует предварительной состоятельной оценки коэффициентов в предположении наличия ошибок.

2. Исследование показало достаточно высокую мощность теста, позволяющую применять его для широкого класса практических задач.

3. Приведены примеры исследования теста с помощью статистического моделирования методом Монте-Карло.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болдин, М. В. Знаковый статистический анализ линейных моделей / М. В. Болдин, Г. И. Смирнова, Ю. Н. Тюрин. – М.: Наука, Физматлит, 1997. – 288 с.
2. Демиденко, Е. З. Линейная и нелинейная регрессия / Е. З. Демиденко. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 302 с.
3. Кендалл, М. Дж. Статистические выводы и связи / М. Дж. Кендалл, А. Стюарт. – М.: Наука, Физматлит, 1973. – 900 с.
4. Магнус, Я. Р. Эконометрика. Начальный курс / Я. Р. Магнус, П. К. Катыхов, А. А. Пересецкий. – М.: Дело, 2004. – 576 с.
5. Себер, Дж. Линейный регрессионный анализ / Дж. Себер. – М.: Мир, 1980. – 456 с.
6. Тимашев, С. А. Оценивание линейных структурных соотношений между случайными величинами / С. А. Тимашев, А. Н. Тырсин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2010. – Т. 76. – № 3. – С. 68-71.
7. Тимашев, С. А. Построение линейной регрессионной модели на основе энтропийного подхода / С. А. Тимашев, А. Н. Тырсин // Заводская лаборатория. – 2009. – Т. 75. – № 3. – С. 66-69.
8. Bassett, G.; Koenker, R. Asymptotic Theory for Least Absolute Error Regression. Journal of the American Statistical Association, 1978, V.73 – pp. 618-622.
9. Birkes, D.; Dodge, Y. Alternative Methods of Regression. John Wiley & Sons, Inc., 1993. – 239 p.
10. Ebbes, P.; Wedel, M.; Bockenholt, U.; Steerneman, T. Solving and Testing for Regressor-Error in Dependence when no Instrumental Variables are Available: with New Evidence for the Effect of Education on Income. Quantitative Marketing and Economics, 2005, № 3. – pp. 365-392.
11. Friedman, Milton A. A Theory of Consumption Function. Princeton University Press, 1957. – 342 p.
12. Green, W.H. Econometric Analysis, 5th ed. Prentice Hall, 2003. – 983 p.
13. Hausman, J. Specification Tests in Econometrics. Econometrica, 1978. V. 46. – pp. 1251-1271.

МАШИНОСТРОЕНИЕ
MECHANICAL ENGINEERING

Марьин Б. Н., Сысоев О. Е., Быченко В. Н., Саблин П. А., Шпорт Р. В.
B.N.Maryin, O.E.Sysoyev, V.N.Bychenko, P.F.Sablin, R.V.Shport

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ
БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

**MANUFACTURING METHODS USED FOR ENSURING DURABILITY AND LONG
LIFETIME OF BOLTED JOINTS/ASSEMBLIES**

Марьин Борис Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: maryinsb@mail.ru.

Mr. Boris N. Maryin – Doctor of Engineering, Professor of the Department of Foundry Industrial Machinery/Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur).

Сысоев Олег Евгеньевич - кандидат технических наук, профессор кафедры «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Mr. Oleg E. Sysoyev – PhD in Engineering, Professor of the Department of Civil and Industrial Construction, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on- Amur).

Быченко Владимир Николаевич – заместитель Председателя Правительства Хабаровского края, министр промышленности и транспорта Хабаровского края.

Mr. V. N. Bychenko — Vice Chairman of the Government of the Khabarovsk Region, Minister for Industry, Transport and Communications of the Khabarovsk Region.

Саблин Павел Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Mr. Pavel A. Sablin – PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur).

Шпорт Роман Вячеславович – заместитель начальника департамента «Гражданские самолеты Сухого» (Россия, Москва).

Mr. Roman V. Shport – Deputy Head of the Department of the Sukhoi Civil Aircraft Company, Moscow.

Аннотация. Рассмотрены конструкторско-технологические методы обеспечения заданной долговечности болтовых соединений.

Summary. The paper considers engineering and processing methods that could ensure a specified durability and lifetime of bolted joints/assemblies.

Ключевые слова: долговечность конструкции, напряженно-деформированное состояние, болтовые соединения, упрочнение отверстий под болты, дорнирование.

Key words: structural durability, stress and strain state, bolted joints, bolt hole hardening, button-rifling.

УДК 629.7

Обеспечение высоких ресурсных показателей является одной из основных задач при создании современных пассажирских и транспортных самолетов. Отказы вследствие повреждений планера самолета в общей сумме отказов составляют 12-30 % [1; 2]. Надежность и долговечность авиационных конструкций в значительной степени определяются усталостной прочностью наиболее ответственных деталей и элементов конструкции планера. В процессе



эксплуатации разрушения возникают, главным образом, в местах возникновения очагов концентрации напряжений.

Результаты экспериментальных исследований и испытаний на выносливость, а также опыт эксплуатации самолетов показали, что ресурс планера самолета, в первую очередь, определяется ресурсом болтовых и заклепочных соединений, которые являются концентраторами напряжений и источниками зарождения усталостных трещин. Зарождение усталостных трещин в силовых элементах планера в зоне установки болтов предопределяется концентрацией напряжений в этой зоне и интенсивностью развития фреттинг-коррозии при контактном взаимодействии и переменных нагрузках, вызывающих деформации и микросмещения деталей.

В конструкции современных самолетов количество болтовых соединений (БС) составляет 300-300 000 шт., в зависимости от категории самолета, при этом 50-70 % болтов устанавливается в высоконагруженных зонах.

Ресурс болтовых соединений в значительной степени зависит от конструктивных параметров этих соединений, способов образования отверстий и установки болтов, характера посадки болта в отверстие, параметров свинчивания соединения, характера контакта сопрягаемых поверхностей. Следовательно, задача обеспечения заданной долговечности болтовых соединений является конструкторско-технологической.

Основными конструктивно-технологическими параметрами, оказывающими влияние на ресурс болтовых соединений, являются:

- характер посадки болта в отверстие;
- упрочняющая обработка отверстий под болты;
- осевая стяжка пакета в результате свинчивания болтового соединения;
- точность и стабильность технологических процессов выполнения соединений.

Совокупность конструктивно-технологических параметров болтового соединения должна обеспечивать благоприятное с точки зрения долговечности конструкции напряженно-деформированное состояние (НДС) в зоне соединения. Характер НДС в этой зоне определяется действующими эксплуатационными нагрузками и величиной остаточных напряжений, возникших в деталях в процессе обработки отверстий под болты, напряжений, вызванных установкой болтов в отверстия с радиальным натягом, и напряжений от силы сжатия пакета деталей в результате свинчивания болтовых соединений.

Для болтовых соединений, работающих на срез, предпочтительным следует считать такой вариант конструктивно-технологического выполнения этих соединений, при котором абсолютные значения растягивающих напряжений в деталях пакета минимальны, сжимающих – максимальны, амплитуда действующих локальных напряжений – минимальна.

Обработка отверстий под болты резанием (сверлением, развертыванием, протягиванием) не создает в поверхностном слое отверстия сколько-нибудь значительных остаточных напряжений. Создание благоприятного НДС достигается применением упрочняющих методов обработки отверстий пластическим деформированием материала деталей в зоне отверстия.

К упрочняющим методам обработки отверстий, нашедшим практическое применение, относятся: раскатка, дорнирование, чеканка переходных кромок отверстий.

Пластическое деформирование деталей при раскатке и дорнировании осуществляется за счет того, что диаметр инструмента (раскатника, дорна) больше диаметра обрабатываемого отверстия, т.е. инструмент входит в отверстие с натягом. Величина натяга при этом равна разности диаметра инструмента и диаметра отверстия, подготовленного под обработку.

При упрочнении отверстий раскаткой значение оптимального натяга составляет 0,6-0,8 % [3; 4]. После раскатывания с этим натягом отверстий в пластине из алюминиевого сплава Д16Т величина остаточных напряжений на глубине около 0,3 мм достигает 160-200 МПа. Вблизи поверхности отверстия величина этих напряжений уменьшается в 2,5-4 раза. Приме-

нение раскатки отверстий под болты позволяет увеличить долговечность болтовых соединений в 2-3 раза.

Достоинствами процесса раскатывания отверстий, кроме указанного обеспечения благоприятного НДС вблизи отверстия, являются:

- снижение шероховатости поверхности отверстия в результате его раскатывания;
- отсутствие необходимости в применении специального механизированного инструмента.

К недостаткам процесса раскатывания отверстий следует отнести:

- отклонения диаметров отверстий после раскатки, превышающие предельные отклонения по Н9;
- сложность конструкции раскатников, и соответственно, их высокая стоимость;
- невозможность создания надежной конструкции раскатников для обработки отверстий диаметром менее 8 мм;
- необходимость периодической регулировки раскатников для обеспечения заданной точности обработки отверстий;
- необходимость выдерживания в процессе раскатки осевой подачи в пределах 0,4-0,8 мм/об. Раскатывание с меньшей подачей приводит к многократному прокатыванию роликов по одному и тому же месту поверхности отверстия, что вызывает перенаклеп и шелушение поверхности.

Упрочнение отверстий методом дорнирования осуществляется за счет создания остаточных напряжений сжатия вблизи отверстия в результате пластического и упругого деформирования материала детали при протягивании дорна через отверстие. Дорнирование отверстий позволяет создать остаточные напряжения сжатия величиной 150-350 МПа в зависимости от величины натяга при дорнировании. Максимальные значения остаточных напряжений сжатия расположены на расстоянии 0,2-0,3 мм от стенки отверстия, а глубина залегания напряжений сжатия достигает 1,5-2,5 мм, что позволяет создать более благоприятное НДС по сравнению с упрочнением методом раскатки.

Результаты испытаний образцов из алюминиевого сплава В95Т со свободными лорнированными отверстиями диаметром 8 мм (см. рис. 1) показали, что дорнирование отверстий с натягом 3,0-3,5% повышает долговечность образцов примерно в 3-5 раз.

Аналогичные результаты получены при испытаниях образцов двухрядных двухсрезных болтовых соединений. Материал образцов – алюминиевый сплав В95Т. Отверстия под болты лорнировались с натягами 1,2, 2,4 и 3,6 %. Окончательная обработка отверстий осуществлялась развертыванием. Припуск на развертывание составлял 0,02-0,04 мм на сторону. Отклонения диаметров отверстий после развертывания не превышали предельных отклонений по Н7. Болты диаметром 8 мм устанавливались в отверстия с зазором от 0 до 30 мкм. Свинчивание болтовых соединений осуществлялось крутящим моментом, равным 16 Нм. Испытания проводились при значениях номинальных растягивающих напряжений 130, 150 и 180 МПа и коэффициентом асимметрии цикла $R = 0,1$.

Результаты испытаний образцов (см. рис. 2) показали, что при установке болтов с зазором дорнирование отверстий повышает долговечность болтовых соединений примерно в 3 раза. Оптимальное с точки зрения долговечности значение натяга при дорнировании зависит от величины действующих напряжений, поэтому величина натяга должна назначаться с учетом величины напряжений, возникающих в конструкции изделия от действия эксплуатационных нагрузок.

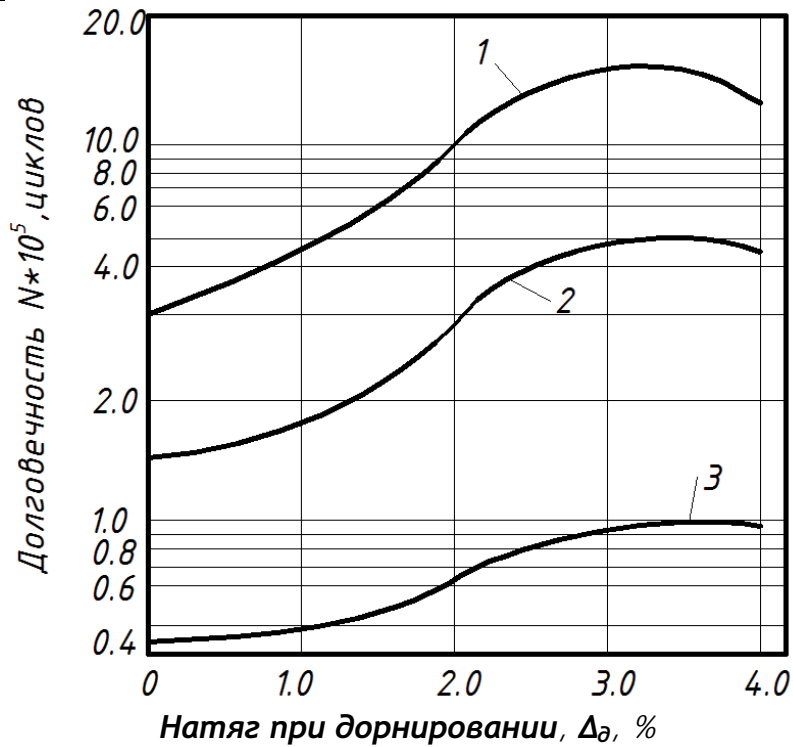


Рис. 1. Зависимость долговечности образцов из алюминиевого сплава В95Т с дорнированными отверстиями от натяга при дорнировании и номинальных растягивающих напряжений при испытаниях: 1 – $\sigma_{НОМ} = 120$ МПа; 2 – $\sigma_{НОМ} = 150$ МПа; 3 – $\sigma_{НОМ} = 180$ МПа

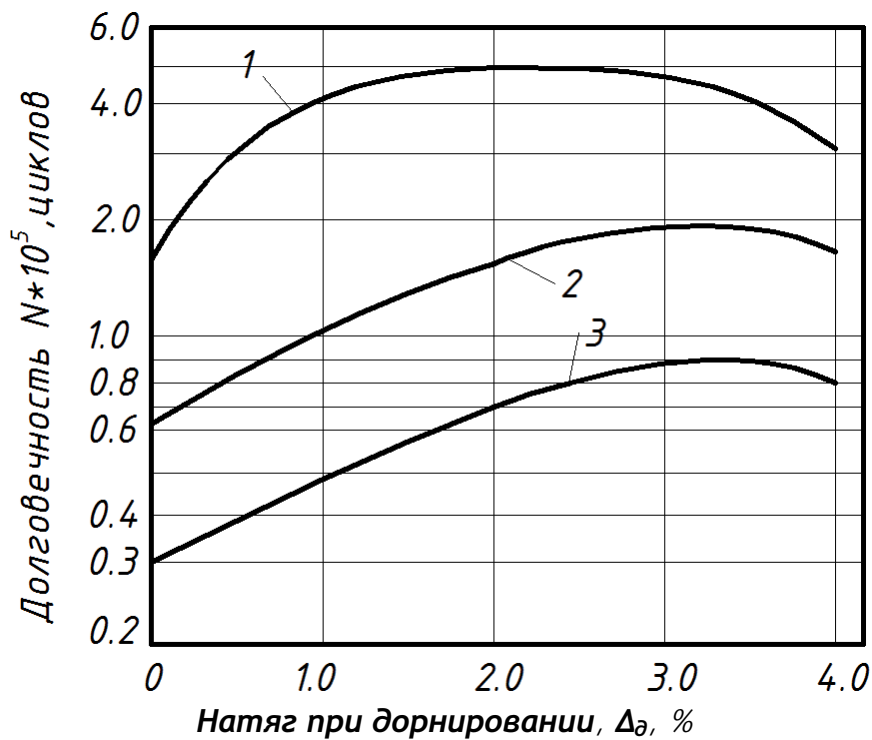


Рис. 2. Зависимость долговечности образцов болтовых соединений от натяга при дорнировании отверстий под болты и номинальных растягивающих напряжений при испытаниях: 1 – $\sigma_{НОМ} = 120$ МПа; 2 – $\sigma_{НОМ} = 150$ МПа; 3 – $\sigma_{НОМ} = 180$ МПа

Дорнирование применяется для упрочнения отверстий диаметром 5-16 мм в деталях из алюминиевых сплавов. Величина натяга при дорнировании назначается в пределах 0,5-4 %, исходя из условия достижения заданной долговечности конструкции. К недостаткам дорнирования следует отнести искривление образующего отверстия (так называемая «корсетность») и образование наплывов высотой до 0,1 мм и шириной до 1 мм у кромок отверстий. Эти отклонения оказывают отрицательное влияние на долговечность болтовых соединений из-за уменьшения площади контакта болта и стенки отверстия. Особенно сильно это проявляется при малой толщине деталей, входящих в пакет. Для уменьшения вредного влияния корсетности и наплывов рекомендуется перед выполнением дорнирования по кромкам отверстий снять фаски величиной 0,5x45°.

Точность отверстий после дорнирования, как правило, не выше девятого-десятого квалитетов. Это обусловлено, во-первых, разбросом величины упругого восстановления диаметра отверстия после дорнирования (см. рис. 3) и, во-вторых, отклонением от цилиндричности отверстия в результате облегченных условий деформирования вблизи кромок отверстия. Поэтому дорнирование в качестве окончательной операции обработки отверстий под болты может применяться для болтов, устанавливаемых с посадками по одиннадцатому-двенадцатому квалитетам. Для болтов, устанавливаемых с посадками по седьмому-девятому квалитетам, после дорнирования необходимо выполнить окончательную обработку отверстий развертыванием или режущим протягиванием.

Конструктивно дорн для обработки отверстий состоит из следующих частей (см. рис. 4):

- хвостовика для установки дорна в захват механизированного инструмента;
- направляющей для центрирования дорна в отверстии;
- дорнирующего элемента с заборным конусом, цилиндрической ленточкой и обратным конусом.

Для дорнирования отверстий в местах конструкции изделия с ограниченными подходами в зону обработки могут использоваться составные дорны (см. рис. 5).

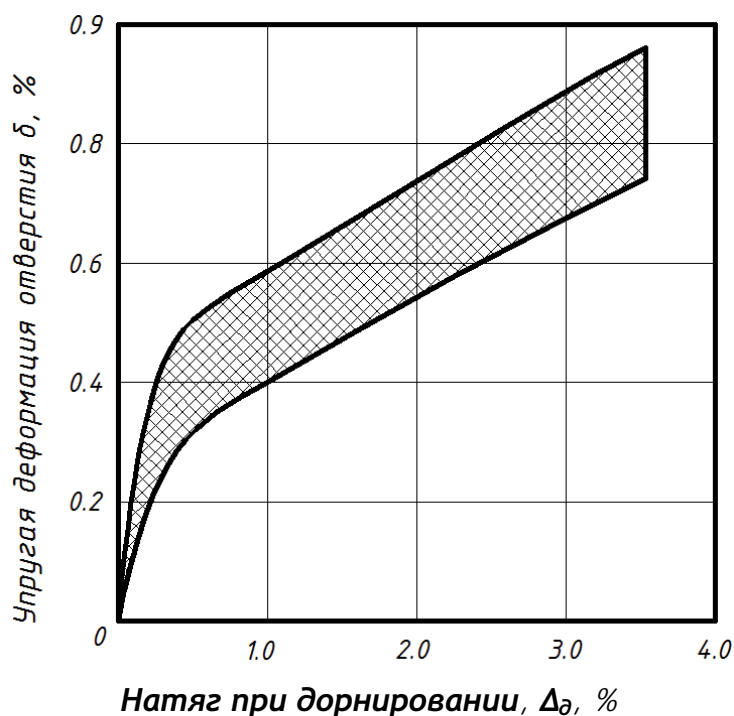


Рис. 3. Зависимость упругой деформации отверстия от натяга при дорнировании

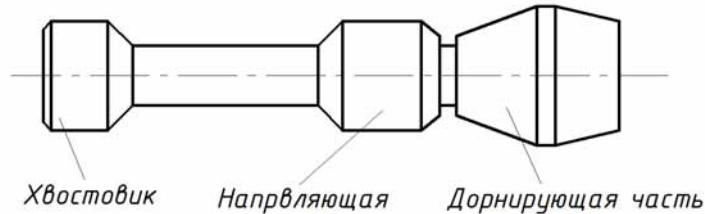


Рис. 4. Дорн

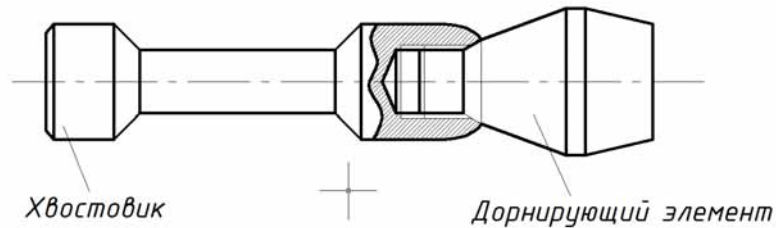


Рис. 5. Составной дорн

Диаметр дорнирующего элемента рассчитывается с учетом величины упругого восстановления диаметра отверстия после прохождения дорна по формуле

$$D_0 = d \cdot \left(1 + \frac{\delta}{100}\right), \quad (1)$$

где D_0 – исполнительный диаметр дорнирующего элемента, мм; d – диаметр обработанного отверстия, мм; δ – величина упругого восстановления диаметра отверстия, %.

Дорны изготавливаются из инструментальных или быстрорежущих сталей. Твердость дорнирующего элемента должна быть не менее HRC 62-64. Износ дорна в процессе дорнирования происходит из-за адгезионного схватывания в зоне контакта дорна с обрабатываемым материалом. При этом наблюдается ухудшение шероховатости поверхности дорна и стенок обрабатываемого отверстия. Для снижения интенсивности адгезионных процессов дорнирование рекомендуется выполнять с применением смазок. Смазка должна обеспечивать режим гидродинамического трения в процессе дорнирования [5]. К таким смазкам относятся смазки, динамическая вязкость которых выше 200 Па·с, в частности, петролатум ПП-95/5 ГОСТ 4113-80.

Восстановление работоспособности изношенного дорна осуществляется полировкой дорнирующего элемента в пределах допустимых отклонений на его исполнительный диаметр.

Упрочнение отверстий под болты методом дорнирования включает в себя следующие операции:

- обработку отверстий с припуском под дорнирование развертыванием в два или три перехода или протягиванием в один переход (величина припуска под дорнирование назначается из расчета получения заданного натяга при дорнировании);
- дорнирование отверстий с припуском под окончательную обработку (отклонение диаметров отверстий после дорнирования не превышает предельных отклонений по Н11; шероховатость поверхности дорнированных отверстий не более $R_a = 0,8$ мкм);
- окончательную обработку отверстий развертыванием или протягиванием в один переход (отклонения диаметров отверстий после обработки не должны превышать предельных отклонений по Н9; шероховатость поверхности отверстий должна быть не более $R_a = 1,6$ мкм).

Совместить указанные операции возможно применением комбинированной протяжки-дорна (см. рис. 6). Трудоемкость обработки отверстий в этом случае снижается в два-три раза, однако затраты на обработку отверстий возрастают из-за существенного увеличения расходов на инструмент.

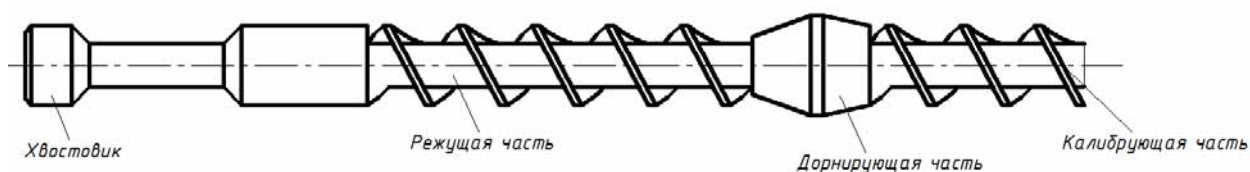


Рис. 6. Комбинированная протяжка-дорн

Для осуществления процесса дорнирования к дорну должно быть приложено осевое усилие, величина которого зависит в основном от диаметра дорнирующего элемента (см. рис. 4).

Дорнирование отверстий осуществляется одним из способов:

- протягиванием дорна через отверстие с помощью протяжных машин или машин для установки болтов с натягом;
- проталкиванием дорна с помощью прессов или пневматических молотков.

Метод протягивания дорна, обеспечивающий более высокую стабильность качественных характеристик лорнированных отверстий, является предпочтительным.

Протягивание дорна через отверстие осуществляется с помощью протяжных машин моделей МП 10-130, МП 12-150 или болтозатягивающих машин моделей МБЗ-1,5, МБЗ-4 [6], оснащенных специальными патронами для закрепления дорнов. При необходимости дорнирования отверстий в местах с ограниченными подходами в зону обработки следует применять указанные болтозатягивающие машины с угловыми насадками.

Модель механизированного инструмента выбирается исходя из условия обеспечения необходимого осевого усилия (см. рис. 7) на штоке машины и величины рабочего хода штока на 5-10 мм больше, чем толщина пакета деталей в месте расположения лорнируемого отверстия.

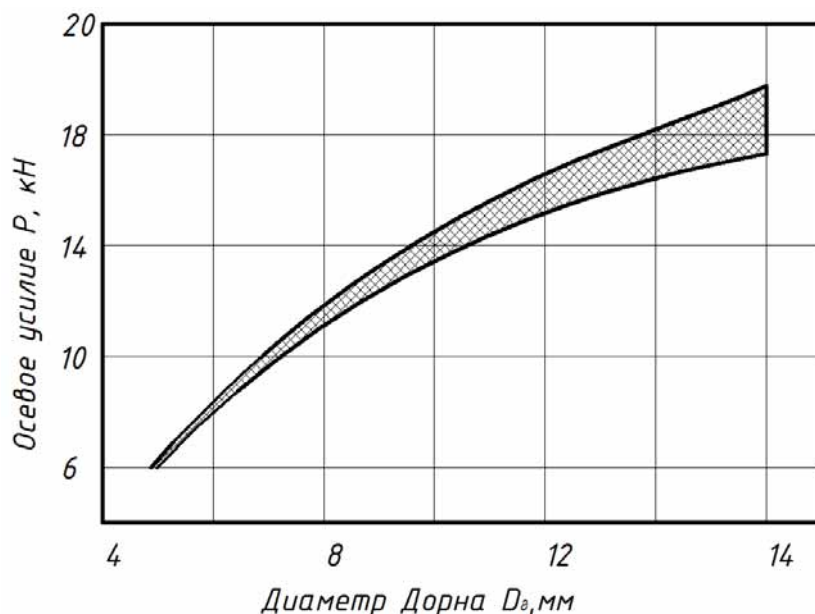


Рис. 7. Зависимость требуемого осевого усилия от диаметра дорна при дорнировании с натягом 3 %

Дорнирование методом проталкивания дорна через отверстие осуществляется с помощью прессов различной конструкции, например пневмоскоб, или ударным способом, например с помощью пневматических молотков [2]. Оба способа находят ограниченное применение из-за недостаточной стабильности процесса вследствие ненадежного центрирования дорна в отверстии и, в связи с этим, возможности повреждения стенок.



Рис. 8. Испытательная машина МИК40у

Приведенные вышеуказанные экспериментальные исследования проводились на испытательной машине МИК40у (см. рис. 8) в лаборатории «Обработка металлов давлением» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета.

Выводы:

1. Достоинствами процесса дорнирования отверстий являются:
 - снижение шероховатости поверхности отверстий;
 - простота конструкции дорнов и, соответственно, их низкая стоимость;
 - отсутствие влияния субъективного фактора на качество дорнированных отверстий.
2. К недостаткам процесса дорнирования отверстий следует отнести:
 - отклонения диаметров отверстий после дорнирования из-за корсетности (не менее предельных отклонений по Н9);
 - необходимость применения специализированного пневмогидравлического механизированного инструмента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вигдорчик, С. А. Конструктивно-технологические пути увеличения усталостного ресурса самолетов / С. А. Вигдорчик. – М.: МАИ, 1980. – 64 с.
2. Современные технологии агрегатно-сборочного производства самолетов / А. И. Пекарш, Ю. М. Тарасов, Г. А. Кривов, Б. Н. Марьин [и др.]. – М.: Аграф-пресс, 2006. – 304 с.: ил.
3. Воробьев, Ю. А. Перспективные устройства для реализации процесса дорнирования отверстий / Ю. А. Воробьев, В. В. Воронов // *Авиационно-космическая техника и технология*. Научно-технический журнал. Х. Нац. Аэрокосмический университет «ХАИ». – Вып. 3(11). – 2004. – С. 28-32.
4. Технология выполнения высокоресурсных заклепочных и болтовых соединений в конструкциях самолетов / А. И. Ярковец, О. С. Сироткин, В. А. Фирсов, Н. М. Кисилев. – М.: Машиностроение, 1987. – 191 с.
5. Кривов, Г. А. Система управления качеством производства авиационной техники / Г. А. Кривов, В. А. Матвиенко, В. А. Резников. – Киев: Техника, 2004. – 271 с.
6. ТИ. 07509416.25288.00793. Выполнение болтовых соединений с натягом / Г. А. Кривов, В. А. Матвиенко, В. А. Резников, Б. Н. Марьин, В. Ф. Кузьмин, А. С. Чиркин, А. М. Артазей. – Комсомольск-на-Амуре: КнААПО, 2005. – 66 с.

Бржозовский Б.М., Янкин И.Н., Хайров Д.А.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Бржозовский Б. М., Янкин И. Н., Хайров Д. А.

V.M.Brzhozovski, I.N.Yankin, D.A.Khayrov

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ПОЛЕЗНОЙ ИНФОРМАЦИИ ИЗ СИГНАЛА КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ

EXTRACTION OF USEFUL DATA FROM THE SIGNAL OF OSCILLATION DURING MACHINING OF MATERIALS



Бржозовский Борис Максевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструирование и компьютерное моделирование технологического оборудования в машино- и приборостроении» Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А. (Россия, Саратов). E-mail: bmbsar85@mail.ru.

Mr. V. M. Brzhozovski - Doctor of Engineering, Professor, Head of "Engineering design and computer-aided simulation of processing equipment in machinery manufacturing and instrument-making", City of Saratov State Technical University named after Yu.A.Gagarin. E-mail: bmbsar85@mail.ru.



Янкин Игорь Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование и компьютерное моделирование технологического оборудования в машино- и приборостроении» Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А. (Россия, Саратов). E-mail: yankin10@rambler.ru.

Mr. I. N. Yankin - Doctor of Engineering, Professor, "Engineering design and computer-aided simulation of processing equipment in machinery manufacturing and instrument-making", City of Saratov State Technical University named after Yu.A.Gagarin. E-mail: yankin10@rambler.ru.



Хайров Джавдат Анвярович – аспирант Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А. (Россия, Саратов). E-mail: kimo@sstu.ru.

Mr. D. A. Khayrov – PhD Candidate, City of Saratov State Technical University named after Yu.A.Gagarin.

Аннотация. Рассмотрены способы получения полезной информации из сигнала колебательного процесса, сопровождающего обработку материалов на металлорежущих станках, с целью использования в системах управления технологическим оборудованием.

Summary. The paper considers methods of obtaining useful data from the signal of an oscillation that accompanies processing of materials by metal-cutting machines, with the purpose of using the data in control systems of production facilities.

Ключевые слова: колебательный процесс, спектральное преобразование, фазовая диаграмма.

Key words: oscillation, cutting dynamics, abrasive instrument, quality of correction.

УДК 621.9:531.1

Введение

Обработка материалов на металлорежущих станках сопровождается образованием колебаний, которые являются реакцией его динамической системы на возмущающий характер процесса резания. В зависимости от состояния станка резание может протекать в различных формах – от устойчивого резания, при котором обеспечивается стабильный съём материала и достигаются заданные параметры качества обработки, до перехода в неустойчивую область, в которой возникает детерминированная вибрация и существенное ухудшение качества обработки. Таким образом, колебания, сопровождающие обработку материалов, несут в себе значительную информацию как о состоянии процесса резания, так и о динамическом состоянии технологического оборудования.

Колебательный процесс при резании материалов образуется совокупностью стохастических и детерминированных составляющих. Соотношение между указанными составляющими или их изменение в процессе резания служит критерием выявления нежелательных тенденций и основой прогноза о качестве обработанной поверхности. Поэтому важной задачей динамического мониторинга процесса резания является развитие способов корректной оценки состава колебательного процесса и выделение из него необходимой информации, что может быть использовано в системах управления станком для корректировки условий резания. В статье рассмотрены способы извлечения полезной информации из колебательного процесса, сопровождающего резание материалов, с целью ее использования для управляющих и оптимизационных действий как средства обеспечения качества обработки.

Способ спектральных поверхностей

Одним из наиболее информативных способов обработки сигнала колебательного процесса является частотный метод, позволяющий выполнить исследование его спектрального состава. Оцифрованный сигнал колебательного процесса преобразуется в дискретный спектр, представляющий собой конечную сумму гармонических составляющих. Для нестационарных процессов, к которым относится резание материалов, спектр на различных этапах обработки является функцией времени. Поэтому для исследования амплитудно-частотного состава колебательного процесса при резании на интервале всего времени обработки целесообразно рассчитывать систему спектров на основе коротких реализаций, смещенных во времени на некоторую постоянную величину. Тогда каждый из спектров может рассматриваться как мгновенная характеристика колебательного процесса на ограниченном временном интервале, а система спектров, сдвинутых во времени, образует некоторую спектральную поверхность (см. рис. 1). Она строится в системе координат svt , где ν – частота, t – время, s – амплитуда. Перемещение по массиву ординат с интервалом времени Δt и выполнение расчета спектров в начальные моменты времени t_1, t_2, \dots, t_m приводят к образованию системы частотных полос $s_{\nu 1}(t), \dots, s_{\nu k}(t)$. Разность значений между двумя смежными точками каждой полосы $s_{\nu i}(t)$ соответствует изменению ее текущей ординаты за время Δt . Массив значений $s_{\nu i}(t)$ представляет собой зависимость изменения амплитуды частотной полосы со средней частотой ν_i за период обработки.

Спектральная поверхность, обладая высокой степенью наглядности представления колебательного процесса, может быть использована для оценки его качественных свойств, на которые не влияет уровень сигнала. Для идентификации отдельного спектрального сечения с качественной стороны целесообразно использовать свойство пикообразности его формы в виде коэффициента пикообразности, отражающего наличие и крутизну пиковых участков сечения и рассчитываемого по выражению

$$K_{\Pi} = K_p \cdot K_o \cdot K_r \cdot K_a, \quad (1)$$

где $K_p = D/D_y$ – коэффициент пика (D_y – дисперсия ординат сечения; D – дисперсия ординат, значения которых превышают математическое ожидание m_y); $K_o = \frac{n}{n'-1}$ – коэффициент асимметрии сечения относительно математического ожидания (n – общее число ординат сечения; n' – число ординат, значения которых больше m_y); $K_r = \frac{y_i}{pm_y^2} \sum_{i=1}^p |y_{i+1} - y_i|$ – средний коэффициент крутизны подъема пиковых участков сечения, где p – сумма вершин и впадин сечения; $K_a = \frac{\sum_{i=1}^{n/2} |y_i - m_y|}{\sum_{i=n/2}^n |y_i - m_y|}$ – коэффициент асимметрии сечения по ширине.

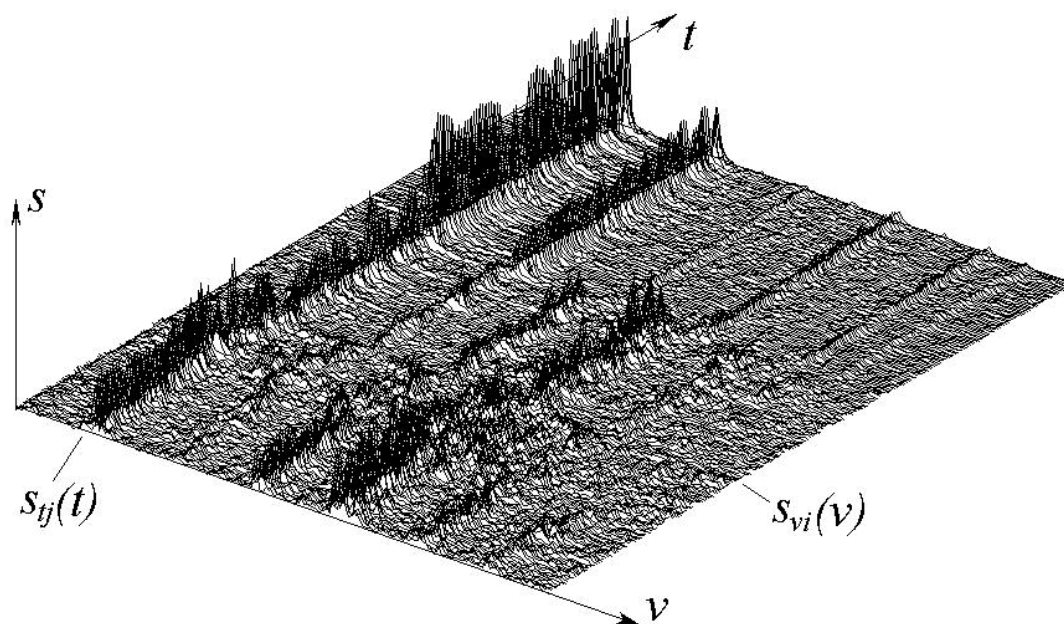


Рис. 1. Спектральная поверхность: $s_{ij}(v)$ – полосные сечения; $s_{vi}(t)$ – спектральные сечения

Для идентификации отдельного полосного сечения с качественной стороны целесообразно использовать свойство динамичности его формы в виде коэффициента динамичности, отражающего степень изменяемости ординат сечения за время обработки и рассчитываемого по выражению

$$K_D = \frac{K_g \cdot K_i}{K_L}, \quad (2)$$

где $K_g = \frac{1}{m_y(n-1)} \sum |y_{i+1} - y_i|$ – коэффициент относительной скорости изменения ординат;

$K_i = \frac{\sigma_y}{y_m}$ – коэффициент формы сечения (y_m – максимальная ордината сечения; σ_y – сред-

нее квадратичное отклонение ординат сечения); $K_L = \frac{L_v}{L}$ – коэффициент искажения сечения по длине (L – длина линии сечения; L_v – длина линии, огибающей вершины сечения).

Таким образом, спектральная поверхность содержит информацию о том, как изменяется спектральный состав колебательного процесса на исследуемом интервале времени обработки. В спектральных сечениях важную роль играет их форма, которая оценивается математическим ожиданием коэффициента пикообразности, отражающим свойство пикообраз-



ности спектров. Пикообразность свидетельствует о том, что в колебательном процессе доминирует одна или несколько форм колебаний. О стабильности этих форм колебаний во времени можно судить по величине дисперсии коэффициента пикообразности. Высокая дисперсия указывает на то, что в исследуемом процессе колебательная энергия перетекает из одних форм колебаний в другие.

Система полосных сечений спектральной поверхности несет информацию об изменении амплитуд частотных полос спектра во времени. На интенсивность их изменения указывает высокое значение математического ожидания коэффициента динамичности полосных сечений. Вместе с тем высокое значение дисперсии коэффициента динамичности свидетельствует о том, что имеет место нестабильность в распределении колебательной энергии по частотным полосам спектра во времени.

Применив методы математической статистики к системам сечений спектральной поверхности, можно получить систему идентификационных показателей колебательного процесса. При высоких значениях дисперсии коэффициента пикообразности системы спектральных сечений и математического ожидания коэффициента динамичности полосных сечений целесообразно применить корреляционный анализ к системе полосных сечений. Форма корреляционной функции содержит информацию о присутствии синхронности в изменении амплитуд частотных полос спектральных поверхностей. Наличие общего закона изменения частотных полос определяется по среднему значению коэффициентов корреляции, рассчитанных между полосным сечением с наибольшей дисперсией коэффициента динамичности и остальными сечениями спектральной поверхности. В частности, синхронное изменение амплитуд сечений указывает на наличие в формообразующей системе станка мощного источника колебаний, который навязывает динамической системе свой ритм движения. Таким источником, например, может быть вращающаяся деталь или инструмент при наличии существенного дисбаланса, неравномерность взаимодействия инструмента с деталью на этапе врезания и т.д.

Способ фазовых диаграмм

При резании материалов потеря качества обработки часто связана с образованием в зоне резания детерминированной вибрации. Для ее выявления целесообразно использовать фазовую диаграмму процесса. Она позволяет в координатах «смещение-скорость» получить информацию о возмущенных движениях системы и выявить ее устойчивые и неустойчивые состояния путем наблюдения за траекториями изображающей точки. Фазовый портрет оказывается наиболее эффективным при исследовании нелинейных систем, к которым относятся системы резания. По форме фазовых траекторий представляется возможным судить о бифуркациях динамической системы – о переходах от одного движения к другому – и увязывать их с изменяющимися условиями резания.

В практическом плане фазовую диаграмму динамической системы можно получить из сигнала колебательного процесса, сопровождающего резание материалов. Положение динамической системы в любой момент времени может быть однозначно определено двумя параметрами – текущим смещением и мгновенной скоростью. В этом случае движение динамической системы вдоль исследуемой координаты приобретает двумерный характер и описывается изображающей точкой на фазовой плоскости.

Каждая реализация регистрируемого вибросигнала на конечном интервале времени после преобразования в аналого-цифровом преобразователе описывается массивом ординат $x_1 \dots x_n$ на временном отрезке $T = n \cdot \Delta t$, где Δt – период дискретизации; n – число точек в реализации сигнала.

Первичная информация о составе колебательного процесса может быть получена путем применения классического спектрального преобразования с расчетом коэффициентов Фурье:

$$A_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot \cos(2 \cdot i \cdot j \cdot \pi / n); \quad \Phi_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sin(2 \cdot i \cdot j \cdot \pi / n), \quad j = 1..n/2, \quad (3)$$

где i – порядковый номер точки в реализации колебательного процесса; j – номер гармоники.

При записи вибраций в станках широко используются пьезоэлектрические преобразователи. Они фиксируют сигнал, описывающий изменение ускорения колебательной массы акселерометра. Поэтому для получения сигналов скорости v_i и смещения x_i исходный сигнал подлежит обработке. Для этого используем отфильтрованные коэффициенты Фурье, соответствующие исследуемой реализации колебательного процесса:

$$v_i = \sum_{j=1}^{n/2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{j} \cdot [-A_j \cdot \cos(2 \cdot i \cdot j \cdot \pi / n) + \Phi_j \cdot \sin(2 \cdot i \cdot j \cdot \pi / n)]$$

$$x_i = -\sum_{j=1}^{n/2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{j^2} \cdot [A_j \cdot \sin(2 \cdot i \cdot j \cdot \pi / n) + \Phi_j \cdot \cos(2 \cdot i \cdot j \cdot \pi / n)] \quad (4)$$

Полученные два массива после нормализации и приведения к одному уровню дают возможность построить фазовую диаграмму движений динамической системы по исследуемой реализации колебательного процесса. Текущее положение изображающей точки на фазовой диаграмме определяется парой координат с одинаковыми индексами в массивах X и V .

С целью выявления в исследуемом сигнале детерминированных составляющих используем метод фильтрации случайных гармоник, приняв $A_j = 0$, $\Phi_j = 0$ для гармоник спектра (3) с амплитудой:

$$A_m < \frac{2K_\phi}{n} \sum_{j=1}^{n/2} \sqrt{A_j^2 + \Phi_j^2}, \quad (5)$$

где $K_\phi < 1$ – коэффициент фильтрации; A_j и Φ_j – синусные и косинусные коэффициенты Фурье. При этом фильтрации подвергаем исходный сигнал колебательного процесса, а сигналы скорости и смещения собираем уже по преобразованному сигналу с использованием гармонических коэффициентов.

Для обоснования верхней границы фильтрации выполнен статистический эксперимент на достаточно большом количестве реализаций колебаний, полученных при различных видах обработки (шлифование плоское и внутреннее, растачивание отверстий, обтачивание цилиндрических деталей) с широким варьированием режимов резания. Результаты эксперимента позволили выявить определенную закономерность. В частности, увеличение уровня фильтрации влечет за собой рост коэффициента корреляции между кривыми, описывающими спектры скорости и ускорения. Установлено, что верхнюю границу фильтрации целесообразно ограничить по моменту достижения коэффициента корреляции между указанными параметрами на уровне 0,95. Таким образом, алгоритм выявления детерминированных составляющих в сигнале колебательного процесса сводится к нахождению минимального порога фильтрации $K_{\phi min}$ исходного сигнала, при котором коэффициент корреляции достигает значения 0,95. Тогда долевое участие стохастических и детерминированных составляющих в сигнале определится соответственно как $K_{\phi min}$ и $(1 - K_{\phi min})$.

На рис. 2 – 3 показан пример выделения детерминированных составляющих в сигналах колебательных процессов, записанных соответственно на операциях шлифования и точения. В левой части расположены макеты сигналов скорости V и смещения S , далее следуют их спектры в диапазоне частот 0,1-5 КГц и в правой части помещены фазовые диаграммы в системе « $S-V$ ».

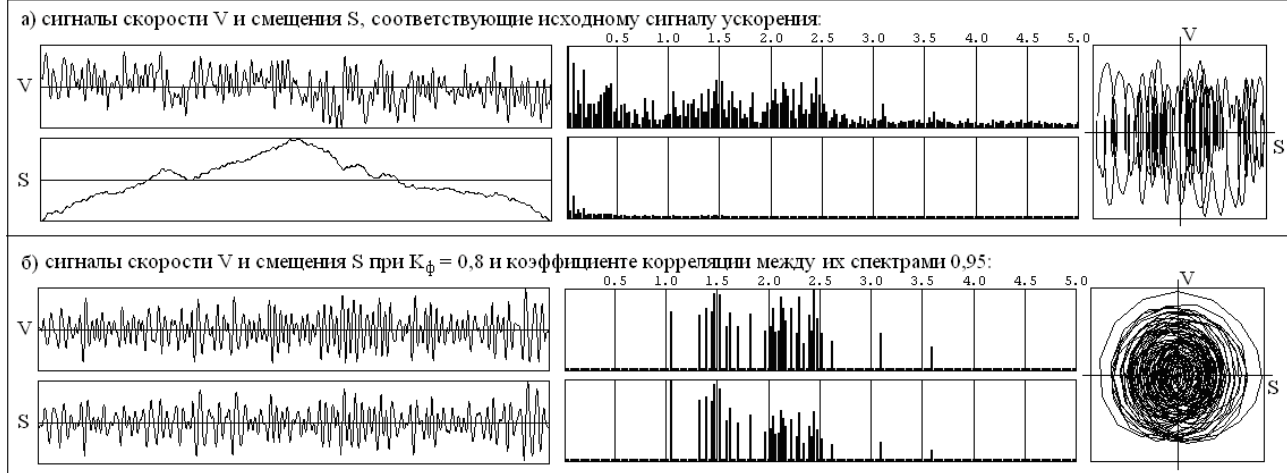


Рис. 2. Пример выявления детерминированных составляющих в сигнале колебательного процесса на операции шлифования

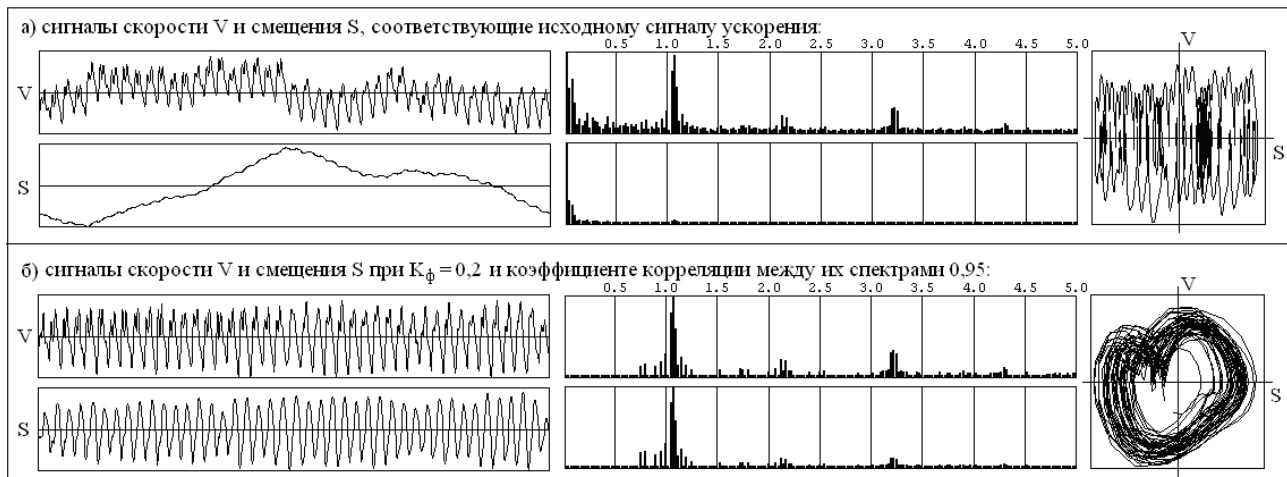


Рис. 3. Пример выявления детерминированных составляющих в сигнале колебательного процесса на операции точения

Как видно, коэффициент корреляции 0,95 между кривыми спектров скорости и смещения наступает при достижении уровня фильтрации 0,8 для шлифования и 0,2 для точения. Отсюда следует, что в сигналах колебательных процессов соотношение между детерминированными и стохастическими составляющими соотносится как 80 % и 20 % для шлифования и 20 % и 80 % для точения.

Заключение

В статье описаны способы обработки записей колебаний с целью применения в исследованиях динамических явлений при механической обработке и идентификации сигналов колебательных процессов. В практических целях они могут быть использованы в системах диагностирования и управления технологическим оборудованием в качестве основы для разработки алгоритмов оценки текущего динамического состояния станка, качества процесса резания и в других технических системах, где требуется высокая информативность о протекающих колебательных процессах.

Оглоблин Г. В., Стулов В. В.
G.V.Ogloblin, V.V.Stulov

МОДЕЛЬ В ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ

A MODEL IN THE AIRFLOW



Оглоблин Гарий Васильевич – кандидат педагогических наук, заслуженный учитель РФ, доцент кафедры теории и методики технологического образования Амурского гуманитарно-педагогического государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: g-ogloblin@yandex.ru.

Mr. Gariy V. Ogloblin – PhD in Education, the Honored Teacher of the Russian Federation, Assistant Professor at the Department of theory and methodology of engineering education, The Budget Amur Humanitarian&Educational State University (Komsomolsk on Amur) E-mail: g-ogloblin@yandex.ru

Стулов Вячеслав Викторович – доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель РФ, заместитель директора по научной работе Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mail@imim.ru.

Mr. Vycheclav V. Stulov – Doctor of Engineerings, Professor, the Honored Inventor of the Russian Federation, Deputy Director for Research, Institute for Machine Engineering and Metallurgy of the Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mail@imim.ru

Аннотация. С использованием жидких кристаллов выполнено моделирование обтекания трёх тел потоком воздуха. Приведено сравнение с результатами моделирования по традиционной методике.

Summary. Using liquid crystals, the authors have modeled the airflow of three bodies. A comparison with the results of modeling by a traditional technique is presented.

Ключевые слова: модель, воздушный поток, жидкие кристаллы, детектор.

Key words: model, airflow, liquid crystals, detector.

УДК 532.738:548-14

Введение. Известно, что при обтекании воздушным потоком твердого тела поток испытывает деформации, это приводит к изменению скорости, давления, температуры и плотности в струйках потока [1]. Воздушный поток становится неоднородным, возникают аэродинамические силы и моменты. Для визуализации физической картины процесса обтекания воздушным потоком тела используют дымканалы, шелковинки, бумажные ленты, оптические методы и т.д. Полученную видимую картинку принято называть аэродинамическим спектром. Нами предлагается ещё один способ, позволяющий также получить аэродинамический спектр с помощью детектора на жидких кристаллах.

Цель работы: моделирование обтекания воздухом тел различной конфигурации с использованием жидких кристаллов.

Приборы и материалы: фен с тремя режимами работы, моделируемые тела (пластина, цилиндр, крыло), детектор на жидких кристаллах холестерического типа.

Параметры воздуха [3]: $t = 40^{\circ}\text{C}$; $\beta = 1,09 \text{ кг/м}^3$; $C = 1000 \text{ Дж/кг}\cdot\text{K}$; $\lambda = 2,72 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/м}\cdot\text{K}$; $\text{Pr} = 0,71$; $\nu = 17,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $a = 24,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Скорость воздуха на модели $V_B = 0,9 \text{ м/с}$.

Параметры моделей: 1) Пластина – $a \cdot b$, мм. 2) Цилиндр – $R \cdot l$, мм. 3) Крыло – $l \cdot b$, мм.

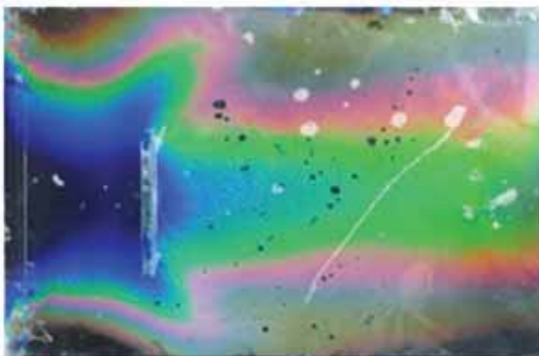
Методика эксперимента. Модели размещают на детекторе, и от теплового генератора подводится нагретый воздух перпендикулярно (поверхности пластины, оси цилиндра, рабочей поверхности крыла). В результате на экране детектора появляется цветное изображение процесса обтекания воздухом моделей, которое зависит от силы давления воздушного потока, определяемого по формуле [3]

$$F = C_x \frac{\rho S}{2} V_{\text{п}}^2, \quad (1)$$

где F – сила давления воздушного потока (н); C_x – коэффициент сопротивления, зависящий от формы тела; ρ – плотность воздуха $1,29 \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right)$; S – площадь поперечного сечения пластины (м^2), $V_{\text{п}}$ – скорость потока воздуха ($\frac{\text{м}}{\text{с}}$). Для тонкой пластины небольших размеров расположенной перпендикулярно воздушному потоку $C_x = 1,11$ [3].

Результаты исследований. На рис. 1, а – 3, а приведены картины обтекания нагретым воздухом трёх моделей. Для сравнения на рис. 1, б – 3, б – картины обтекания воздухом тел, полученные с использованием существующих методик. На рис. 4 – градуированная шкала. Сравнение полученных картин, приведённых на рис. 1, а – 3, а с изображениями на рис. 1, б – 3, б показывает, что применение разработанного жидкокристаллического детектора и методики проведения опыта позволяет визуализировать с помощью температур процесс обтекания тел различной формы. При этом температурное поле на трёх моделях представлено семейством изотерм 27-33 °С. Ультрафиолетовый цвет 33 °С характеризует область повышенного давления перед моделью (см. рис. 1 – 3), а коричневый (28 °С) и красный (27 °С) – минимальное давление и сопротивление обтекающего потока.

а)



б)

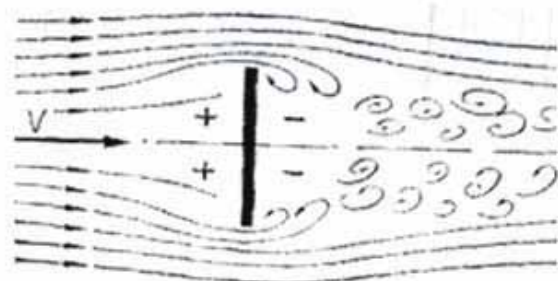
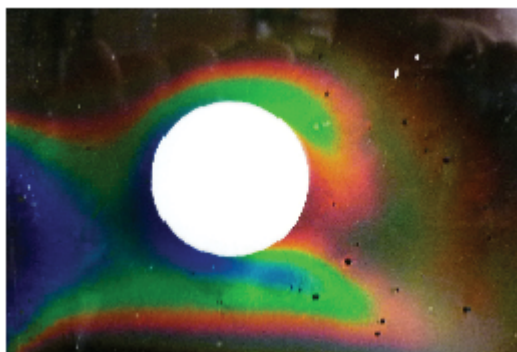


Рис. 1. Прямоугольная пластина в воздушном потоке: а – физическая картина обтекания прямоугольной пластины воздушным потоком, полученная с помощью детектора на жидких кристаллах; б – физическая картина обтекания прямоугольной пластины воздушным потоком, полученная традиционным способом

а)



б)

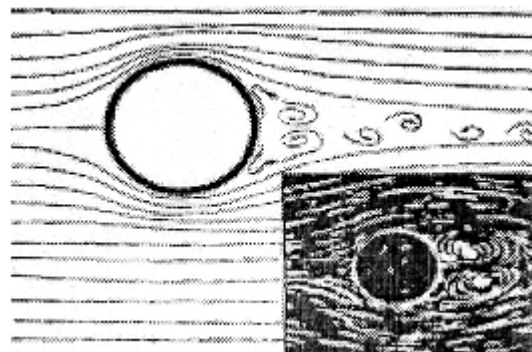


Рис. 2. Цилиндрическое тело в воздушном потоке: а – аэродинамический спектр цилиндра, полученный с помощью жидкокристаллического детектора; б – аэродинамический спектр цилиндра, полученный традиционным способом

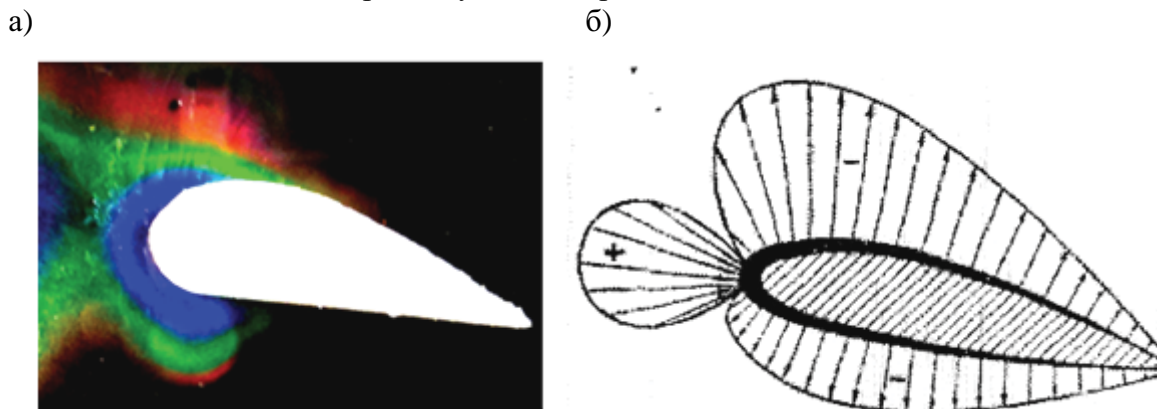


Рис. 3. Аэродинамический спектр крыла самолёта. Распределение давления по профилю крыла: а – термограмма крыла самолёта; б – графическое представление

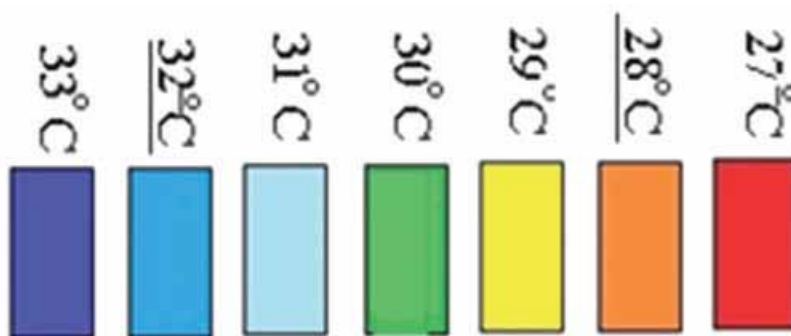


Рис. 4. Градуированная шкала. Ультрафиолетовый цвет 33 °С, синяя 32 °С, голубая 31 °С, зелёная 30 °С, жёлтая 29 °С, коричневая 28 °С, красная 27 °С.

Проведём анализ подобия процессов на модели (м) и натуре (н). На практике критерии подобия определяются в результате анализа размерностей параметров, описывающих процесс, или в результате анализа дифференциальных уравнений. Выполним анализ размерностей на примере задач о давлении воздушного потока на модели. При этом успех дела зависит от правильности определения физических величин, влияющих на процесс, что определяется интуицией [4].

Изменение давления ΔP [н/м²] при обтекании воздухом тел зависит от: плотности воздуха ρ [кг/м³], скорости воздушного потока V_B [м/с], площади обтекаемого тела S [м²], теплопроводности воздуха λ [Дж/с·м·К]. Для определения безразмерных комплексов применяется алгебраический метод Рэлея [4]:

$$\Delta P = A \rho^a V_B^b S^c \lambda^d \quad (2)$$

Перепишем (2) в размерностях величин:

$$\text{Н/м}^2 = (\text{кг/м}^3)^a \cdot (\text{м/с})^b \cdot (\text{м}^2)^c \cdot (\text{Дж/с} \cdot \text{м} \cdot \text{К})^d \quad (3)$$

Суммирование показателей степеней при одинаковых единицах приводит к системе уравнений:

$$\text{Дж} \dots \dots \dots 0 = 2, \quad (4)$$

$$\text{Кг} \dots \dots \dots 1 = a, \quad (5)$$

$$\text{С} \dots \dots \dots (-2) = -b - 2, \quad (6)$$

$$\text{М} \dots \dots \dots (1) = -3a + b + 2c - 2, \quad (7)$$

$$K \dots \dots \dots 0 = -2. \quad (8)$$

Решение (4) – (8) даёт: $2 = 0$, $a = 1$, $b = 2$, $v = 1$, обозначив $S = X^2$, где X – характерный размер, подставим в основное уравнение (2), получим:

$$\Delta P = A \rho V_B^2 \cdot X^2 \quad (9)$$

или

$$\Delta P / \rho V_B^2 = Eu = AX^2, \quad (10)$$

где Eu – число Эйлера, характеризующее меру отношения сил давления и инерции в потоке воздуха. На модели $\Delta P = F/S$, где F – сила давления потока, определяемая по формуле (1). На модели определяется $\Delta P_M = C_x \cdot \rho V_B^2 / 2$, где C_x – коэффициент сопротивления потоку, определяемый по справочнику или расчётным путём [3]. В результате при известных на модели ρ , V_B , C_x , X_M определяется диапазон значений (Eu). При $(Eu)_M = (Eu)_H$; $(C_x)_M = (C_x)_H$; $M_x = X_H / X_M$ определяются параметры для натурального образца X_H , ρ_H , $(V_B)_H$.

На рис. 1, а представлена термограмма воздушного потока, обтекающего прямоугольную пластину с использованием жидких кристаллов. Термограмма представлена изотермами разной цветности. Для расшифровки термограммы необходима градуированная шкала для данного типа жидких кристаллов. На рис. 4 представлена градуированная шкала для применяемого детектора. Сопоставляя цвета изотерм со шкалой температур, определяем температурное поле каждой изотермы. Изотермы характеризуют линии тока воздушного потока. Фиолетовая изотерма испытывает резкое изменение перед пластиной, что соответствует резкому изменению скорости, и направления движения. Давление возрастает перед пластиной и падает за ней. Изотермы синяя, голубая, зелёная и т.д. огибают пластину, сохраняя свою неразрывность. На рис. 1, б представлен традиционный способ моделирования. Линии тока воздушного потока испытывают довольно резкое изменение перед пластиной, поток меняет скорость и направление движения, происходит уплотнение и обтекание его на краях пластины. Всё это сопровождается повышением давления перед пластиной и его уменьшением за ней. За пластиной образуется область, где линии тока превращаются в вихри. Аналогично получаем термограммы для цилиндра (см. рис. 2, а) и сравниваем её с аэродинамическим спектром, полученным традиционным методом (см. рис. 2, б). Спектр крыла самолёта представлен на рис. 3, а, который получен с помощью жидкокристаллического детектора, а на рис. 3, б – традиционным способом.

Вывод. Изотермы, созданные жидкими кристаллами, характеризуют скорость линий тока и температуру. Зная исходную скорость воздушного потока, можно определить скорость линии тока одной изотермы через соотношение температур и скоростей, а также получить градиент скоростей перед пластиной и за пластиной. Аналогично задачу можно решить и для давлений в линиях тока, взяв за исходное выражение (1). Предложенная методика моделирования тепловых полей воздушных потоков с помощью жидких кристаллов позволяет получить конечный результат и определить параметры для натуральных образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оглоблин, Г. В. Моделирование тепловых полей воздушных потоков / Г. В. Оглоблин, Е. Г. Федуров // Актуальные проблемы математики, физики, информатики в вузе и школе: материалы в. н-п. к. г. Комсомольск-на-Амуре, 26 марта 2010 г. – Комсомольск-на-Амуре: АмГПУ, 2010. – С. 28-31.
2. Стулов, В. В. Физическое моделирование процессов при получении литой деформированной заготовки / В. В. Стулов, В. И. Одинокоев, Г. В. Оглоблин. – Владивосток: Дальнаука, 2009. – 175 с.
3. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: справ. / Е. В. Аметистов, В. А. Григорьев, Б. Т. Емец [и др.]. – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с.
4. Мигай, М. К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования / М. К. Мигай. – Л.: Энергоиздат, 1987. – 264 с.

Черномас В. В., Ланкина С.В., Саликов С. Р., Лушников Н.Ю.
ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВКИ
ВЕРТИКАЛЬНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛА

Черномас В. В., Ланкина С. В., Саликов С. Р., Лушников Н. Ю.
V.V.Chernomas, S.V.Lankina, S.R.Salikov, N.Y.Lushnikov

**ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВКИ
ВЕРТИКАЛЬНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛА¹**

**THREE-DIMENSIONAL PARAMETRIC MODELING OF A
PLANT FOR VERTICAL CASTING AND METAL DEFORMATION**



Черномас Вадим Владимирович – доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: userman10@mail.ru.

Mr. Vadim V. Chernomas – Doctor of Engineering, Associate Professor, Head of a laboratory, Institute for Machine Engineering and Metallurgy, the Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Komsomolsk-on-Amur).E-mail: userman10@mail.ru



Ланкина Светлана Владимировна – аспирант Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kriza_13@mail.ru.

Ms. Svetlana V. Lankina – PhD Candidate, Institute for Machine Engineering and Metallurgy, the Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kriza_13@mail.ru



Саликов Степан Рудольфович – аспирант Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ssrlc@mail.ru.

Mr. Stepan R. Salikov – PhD Candidate, Institute for Machine Engineering and Metallurgy, the Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ssrlc@mail.ru



Лушников Никита Юрьевич – аспирант Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: raziel.soul@mail.ru.

Mr. Nikita Y. Lushnikov – PhD Candidate, Institute for Machine Engineering and Metallurgy, the Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: raziel.soul@mail.ru

Аннотация. Опытно-конструкторские работы, направленные на проектирование оборудования для реализации совмещенных процессов непрерывного литья и деформации металла, связаны с большими трудностями, возникающими из-за сложности конструкции и кинематики составного кристаллизатора. Для проектирования и анализа возможных конструктивных схем рабочей клетки установки

¹ Работа выполнена при поддержке грантов 12-I-П25-02 и 12-I-ОЭММПУ-06.

вертикального литья и деформации металла предложено использование параметрического моделирования на базе CAD-системы T-Flex.

Summary. Research and development activities aimed at designing equipment for combined processes of continuous casting and metal deformation are linked to great problems caused by the complexity of the design and kinematics of a composite mold. Application of parametric modeling based on the CAD-system T-flex is suggested for design and analysis of possible structural arrangements of the working stand of a vertical casting and metal deformation plant.

Ключевые слова: параметрическая модель, установка вертикального литья и деформации металла, совмещенный технологический процесс.

Key words: parametric model, vertical casting and metal deformation plant, combined process.

УДК 621.771:539.3

Введение

Технологический процесс получения металлоизделий на установке вертикального литья и деформации металла (УВЛДМ) относится к совмещенным металлургическим процессам, то есть процессам, объединяющим в одном устройстве традиционные технологии непрерывного литья и обработки металлов давлением. Примером реализации совмещенных металлургических технологий на производстве является использование установок непрерывного литья и прессования «Conform and Castex» [4; 5; 8]. Технологии на основе процесса «Conform and Castex» предназначены для производства профилей мелких сечений из расплавленного металла (обычно алюминиевого сплава) путем его непрерывной кристаллизации и прессования с небольшими степенями деформации через калибрующее отверстие матрицы. Оборудование комплектуется в виде единого устройства, основными элементами которого являются: узел непрерывной кристаллизации металла (обычно роторного типа) и формообразующая матрица, через которую осуществляется прессование закристаллизовавшегося металла (см. рис. 1).

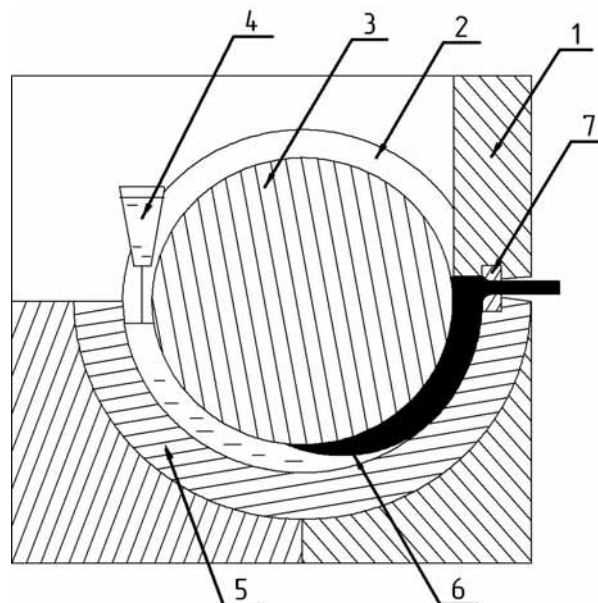


Рис. 1. Схема установки «Conform and Castex»: 1 – разъемный корпус; 2 – канавка ротора; 3 – кольцевая вставка; 4 – литейная воронка; 5 – охлаждаемый ротор; 6 – затвердевший металл; 7 – формообразующая матрица

В этом случае основными конструктивными параметрами, определяющими устойчивость процесса получения металлоизделий, являются величина кольцевого зазора между канавкой колеса и неподвижной вставкой, а также протяженность технологического участка установки, определяемая из условий продолжительности кристаллизации металла и создания требуемых сил контактного трения [1].

Технологический процесс получения металлоизделий с использованием УВЛДМ, в отличие от процесса «Conform and Castex», построен на других принципах. Функцию узла непрерывной кристаллизации металла и формообразующей матрицы выполняют стенки подвижного составного кристаллизатора со сложной их взаимной траекторией движения [3].

На рис. 2 представлена принципиальная схема установки. Установка включает водоохлаждаемый кристаллизатор, который состоит из четырех частей: двух боковых 1, передней 2 и задней 3 стенок. Каждая из боковых стенок 1 приводится в движение двумя приводными эксцентриковыми валами (верхним и нижним) 4, вращение которых направлено в одну сторону. Передняя 2 и задняя 3 стенки кристаллизатора приводятся в движение от нижней пары приводных эксцентриковых валов 4, движение которых направлено навстречу друг другу, и плотно прижимаются к боковым стенкам 1 нажимными устройствами 5, установленными в стенках 6 станины через устройство 7, представляющее собой плоский подшипник с шариками. Боковые стенки 1 имеют наклонные (с углом наклона γ к вертикальной оси симметрии) и прямые участки. Эксцентрики привода 8 верхнего и нижнего валов каждой из боковых стенок сонаправлены и противоположно ориентированы относительно другой пары приводных валов. При вращении приводных эксцентриковых валов 4 боковые стенки 1 совершают навстречу друг другу сложное движение в вертикальной плоскости по замкнутой траектории, которое характеризуется величиной эксцентриков 8 и их ориентацией относительно друг друга. Передняя 2 и задняя 3 стенки кристаллизатора приводятся в движение через эксцентрики, расположенные на крайних участках нижней пары валов 4 и соответствующим образом ориентированные относительно эксцентриков 8 привода боковых стенок 1 кристаллизатора, при вращении приводных валов передняя и задняя стенки совершают возвратно-поступательное движение в вертикальной плоскости. Такое взаимное движение боковых, передней и задней стенок кристаллизатора способствует деформации металла и циклической выдачи (самоподачи) металлоизделия.

Основной особенностью процесса получения металлоизделий с применением УВЛДМ является то, что начало формоизменения металла по высоте кристаллизатора за один технологический цикл происходит в твердожидком состоянии, а калибрование (придание окончательной геометрии требуемого поперечного сечения металлоизделия) – в твердом состоянии с большими степенями деформации (до 0,9). Деформирование материала металлоизделия в твердожидком состоянии способствует удалению (вытеснению) жидкой фазы из кристаллизующегося металла, что позволяет управлять структурой металла, который поступает в калибрующую зону кристаллизатора.

В этом случае основными конструктивными параметрами, определяющими устойчивость процесса получения металлоизделий, являются величина эксцентриков приводных валов и их ориентация относительно друг друга, угол наклона боковой стенки γ , протяженность калибрующего (прямого) участка боковых стенок, общая высота кристаллизатора и т.д. Их величина определяется исходя из требуемых тепловых режимов работы кристаллизатора и параметров напряженно-деформированного состояния в системе «формирующееся металлоизделие – инструмент деформации (составные части кристаллизатора)» [2]. Из-за сложности конструкции и кинематики составного кристаллизатора возникают большие трудности, связанные с проектированием и анализом возможных вариантов конструктивных схем рабочей клетки УВЛДМ. Для устранения этого недостатка предложено использование параметрического моделирования на базе САД-системы T-Flex, которое позволяет провести адекватный анализ различных конструктивных схем и избежать принципиальных ошибок при проектировании.

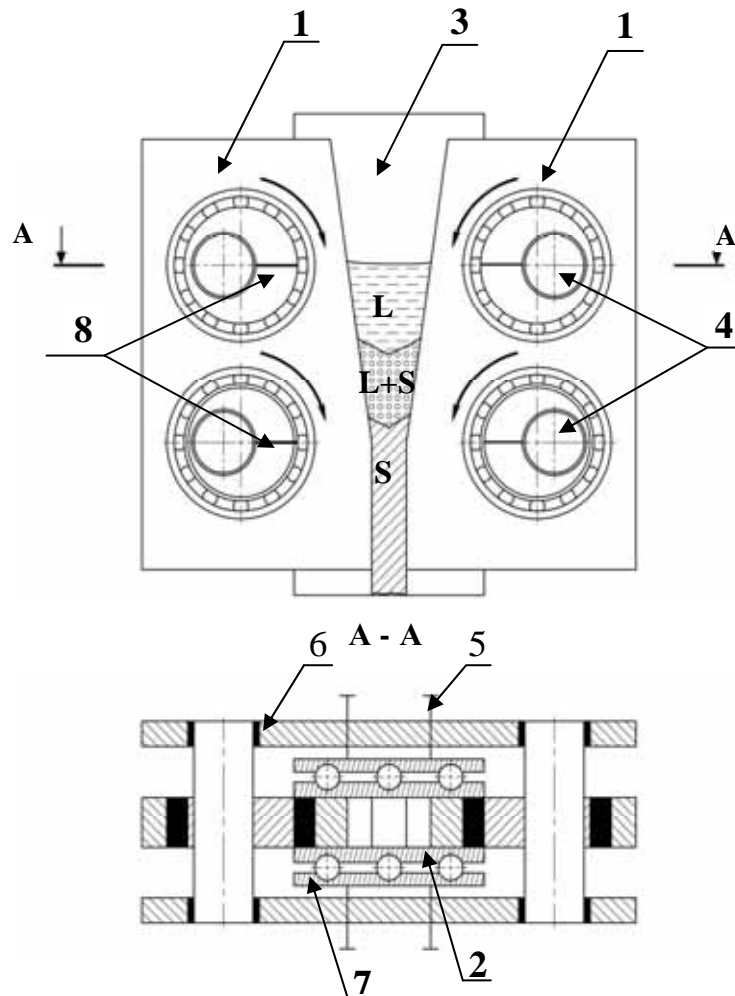


Рис. 2. Схема установки вертикального литья и деформации металла:

- L – жидкая фаза; L+S – твёрдо-жидкая фаза; S – твердая фаза;
- 1 – боковая стенка; 2 – передняя стенка; 3 – задняя стенка;
- 4 – приводные эксцентриковые валы; 5 – нажимное устройство;
- 6 – станина; 7 – плоский подшипник с шариками;
- 8 – эксцентрики приводных валов

Методика проведения исследований

В качестве объекта исследования был выбран экспериментальный стенд (УВЛДМ) для физического моделирования совмещенного процесса литья и деформации металла, разработанный коллективом сотрудников Института машиноведения и металлургии ДВО РАН. УВЛДМ имеет следующие технические характеристики: производительность (регулируемая) – 2,5...6 м/мин, мощность электропривода – 65 кВт; площадь поперечного сечения получаемого металлоизделия – 300 мм² (полоса 60×5 мм); степень деформации изделий (регулируемая) – до 90 %. Методику проведения моделирования удобно представить в виде обобщенной блок-схемы (см. рис. 3).

На совмещенный процесс получения металлоизделий на УВЛДМ оказывают влияние две основные группы параметров: конструктивные (блок 3) и технологические (блок 4) [6].

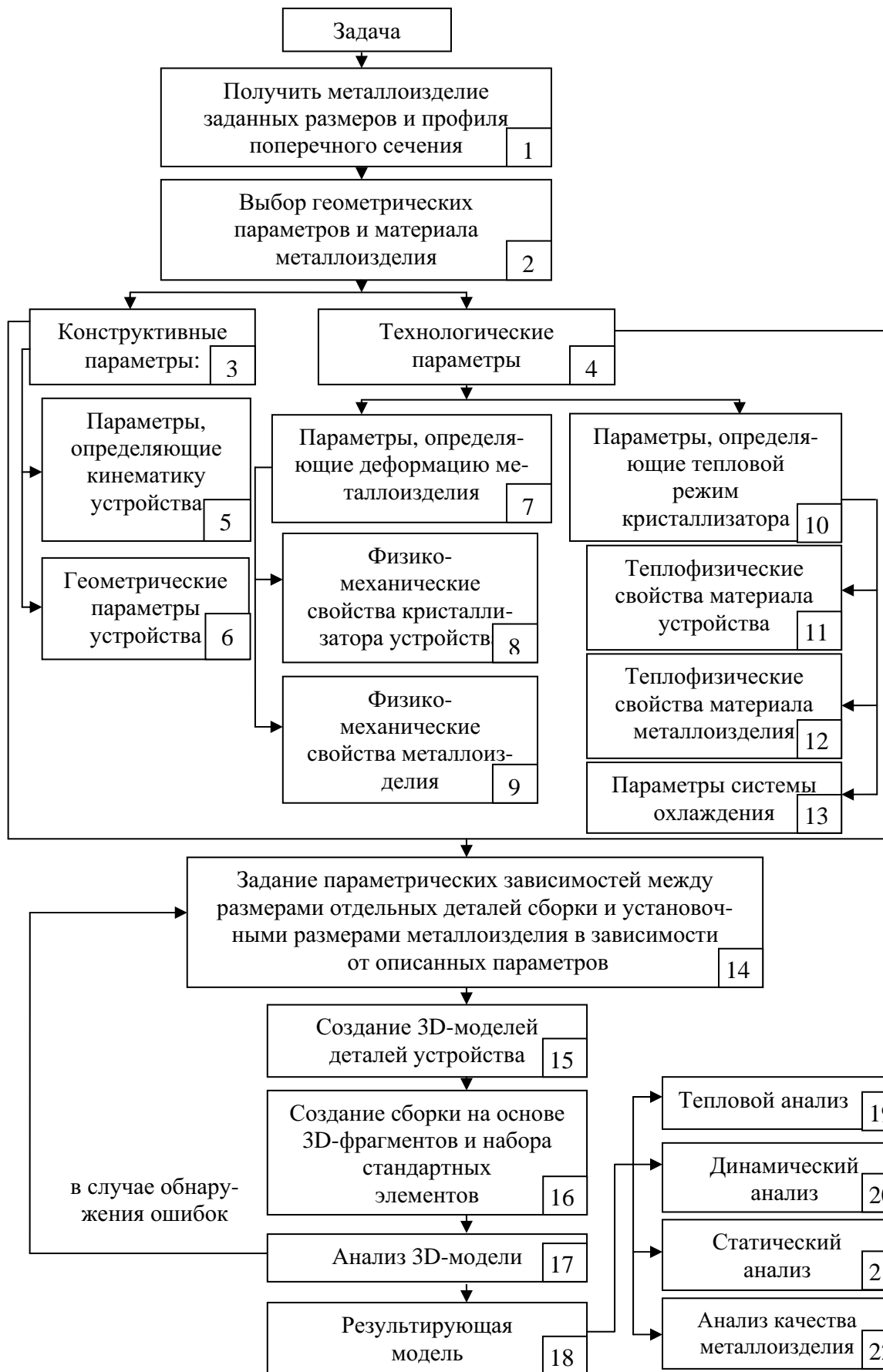


Рис. 3. Общая схема построения параметрической модели УВЛДМ

К конструктивным параметрам, оказывающим влияние на процесс получения металлоизделия, относят параметры, определяющие кинематику устройства (блок 5), и геометрические параметры устройства (блок 6). Численные значения указанных параметров (величина эксцентриков приводных валов, угол поворота эксцентриков, скорость вращения приводных валов, конфигурация и геометрические размеры стенок кристаллизатора и т.д.) задаются в виде констант или параметрическом виде на этапе создания 3D-модели устройства (блоки 14 и 15).

Технологические параметры, которые определяют режимы работы устройства, удобно представить в виде двух групп факторов, которые оказывают влияние на деформационные (блок 7) и тепловые (блок 8) процессы, протекающие в системе «формирующееся металлоизделие – стенки кристаллизатора». К исходным (начальным) данным, характеризующим деформационные процессы, относятся физико-механические свойства материала металлоизделия (блок 8) и материала стенок кристаллизатора (блок 9). К исходным (начальным) данным, характеризующим тепловые процессы, относятся теплофизические свойства материала металлоизделия (блок 11) и материала стенок кристаллизатора (блок 12), а также параметры, характеризующие систему охлаждения стенок кристаллизатора (блок 13) (начальная температура охлаждающей жидкости на входе в систему охлаждения, геометрические параметры системы охлаждения, расход охлаждающей жидкости и т.д.) [7].

Численные значения параметров, входящих в эти блоки, задаются в виде констант или параметрическом виде на этапе создания 3D-модели устройства (блоки 14 и 15). Параметрический вид зависимости параметров (блок 14) определяется из предварительного решения деформационной и тепловой задач, реализуемых в виде отдельных подпрограмм, и корректируется в процессе создания 3D-модели устройства. После задания параметрических зависимостей между размерами отдельных деталей сборки приступают к созданию 3D-моделей деталей устройства (блок 15) и выполнению сборки устройства в целом (блок 16). В ходе анализа построенной 3D-модели УВЛДМ (блок 17) выявляются возможные ошибки, которые устраняются корректировкой параметрических зависимостей (блок 14). После устранения всех ошибок создается результирующая модель (блок 18), которая подвергается тепловому, динамическому и статическому анализу. Завершает процесс моделирования анализ качества получаемых металлоизделий. В процессе теплового анализа с помощью модуля «Т-FLEX Анализ» (блок 19) проводится расчёт температурных или тепловых полей в системе «формирующееся металлоизделие – стенки кристаллизатора». В процессе динамического анализа (блок 20) оцениваются траектории движения, скорости и ускорения элементов исследуемой механической системы, временные характеристики системы, а также силы взаимодействия между элементами системы. При статическом анализе (блок 21) определяется поведение конструкции УВЛДМ и принимаются решения для оптимизации геометрической формы металлоизделия. Анализ качества металлоизделий (блок 22) предполагает проведение ряда операций и приемов, обеспечивающих заданный уровень качества металла в процессе его производства, а также оценку соответствия фактических потребительских характеристик и товарного вида готовой продукции требованиям стандартов (макроструктурный анализ, микроструктурный анализ и др.).

Результаты исследований

При проектировании сборочной трехмерной модели использовали начальные данные, полученные из предварительно разработанных чертежей детализации конструкции УВЛДМ, т.е. составляли сборочную модель из готовых 3D-фрагментов. Каждую модель 3D-фрагмента строили таким образом, чтобы ее можно было изменять при помощи внешних переменных.

В табл. 1, в качестве примера, показано семейство деталей «эксцентриковая втулка», созданных путем перестройки параметрической модели по наборам ее исполнений.

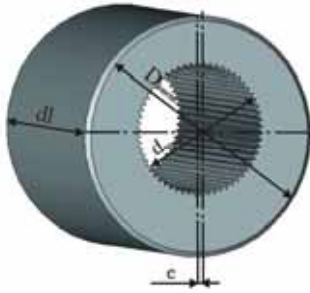
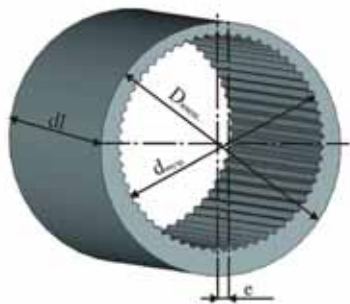
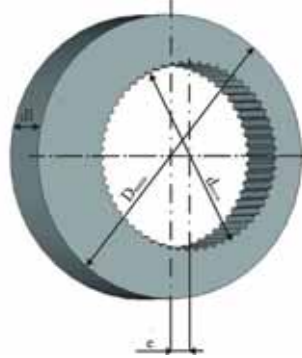
Управление параметрическими компонентами сборки осуществлялось из базы данных сборочного документа. При создании сборочной трехмерной модели УВЛДМ исходили из следующих основных принципов:

- принципа рациональной последовательности и оптимальности схемы формирования моделей сборочных единиц;
- принципа расположения базовых поверхностей моделей сборочных единиц с учетом их сопряжения друг с другом;

- принципа образмеривания контуров моделей сборочных единиц, отображающего размерную структуру первичной детали и корректно учитывающего размерные привязки соседних деталей.

Таблица 1

Параметрическая модель детали «эксцентриковая втулка»

| Наименование детали | Вид модели детали для разных параметров | Конструктивные параметры |
|--|---|--|
| Эксцентриковая втулка боковых стенок верхней пары валов |  | $d_{\text{внутр}} = 60 \text{ мм}$ $D_{\text{внеш}} = 100 \text{ мм}$ $d_l = 96 \text{ мм}$ $e = 3 \text{ мм}$ |
| Эксцентриковая втулка боковых стенок нижней пары валов |  | $d_{\text{внутр}} = 90 \text{ мм}$ $D_{\text{внеш}} = 110 \text{ мм}$ $d_l = 112 \text{ мм}$ $e = 3 \text{ мм}$ |
| Эксцентриковая втулка передней и задней стенок нижней пары валов |  | $d_{\text{внутр}} = 90 \text{ мм}$ $D_{\text{внеш}} = 140 \text{ мм}$ $d_l = 35 \text{ мм}$ $e = 10 \text{ мм}$ |

Построение трехмерной модели детали «эксцентриковая втулка» проводили в 3D-окне с использованием ее 2D-профиля на рабочей плоскости «Вид спереди». Все операции проводили относительно базовых линий построения, которые проходят через начало координат рабочей плоскости и 3D-пространства. Все остальные элементы модели создавались как относительные. Внутренний диаметр втулки был задан в зависимости от диаметра приводного вала $d_{\text{внутр}}$ и в начало координат был помещен центр окружности диаметра $d_{\text{внутр}}$. Далее относительно осевой линии этой окружности была построена прямая на расстоянии e , равном эксцентриситету втулки. Из центра пересечения базовой линии и прямой строили окружность, диаметр которой равен внешнему диаметру втулки $D_{\text{внеш}}$. Шлицы строили при помощи набора стандартных элементов валов, представленных в библиотеке CAD-системы T-Flex. Высоту втулки задавали параметром, равным длине участка вала со шлицами d_l , и получали при помощи операции выталкивания из ее 2D-профиля. Таким образом, изменяя значения параметров, получали 3D-модель необходимой конфигурации эксцентриковой втулки. Используя аналогичный подход, строили параметрические 3D-модели остальных сборочных единиц (деталей).

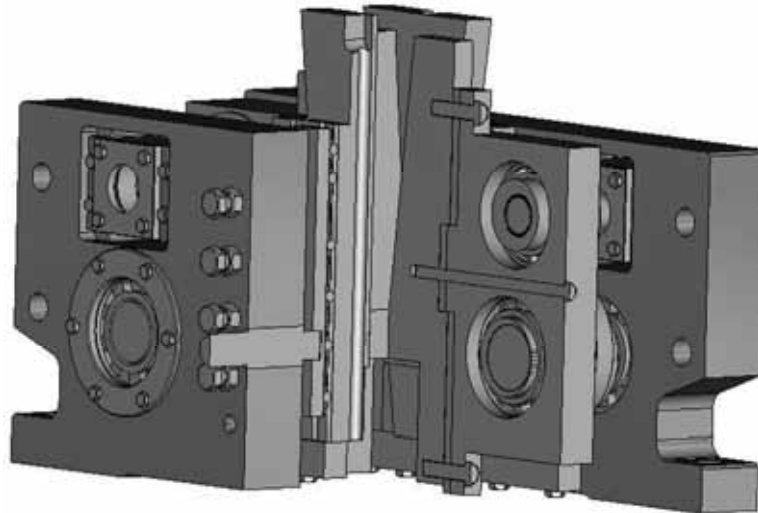


Рис. 4. Параметрическая трехмерная модель УВЛДМ

Для того чтобы в полной мере получить информацию о кинематике УВЛДМ и динамике ее работы (получить анимацию движения ее составных частей), сборку модели из построенных 3D-фрагментов осуществляли с базовых элементов и с тех деталей, которые задают кинематику всех подвижных частей УВЛДМ. Построение модели начали с неподвижной базовой детали – стойки станины, с этой целью фиксировали ее положение в глобальной системе координат. Затем 3D-фрагмент стойки станины сопрягали с 3D-фрагментами остальных сборочных единиц (деталей) через их локальную систему координат. Направление и скорость вращения приводных валов задавали поворотом их локальной системы координат на определенный угол. На рис. 4 представлен окончательный вариант сборки УВЛДМ.

Выводы

В результате проведенных исследований построена на базе САД-системы T-Flex параметрическая модель УВЛДМ, которая позволила провести адекватный анализ конструктивных схем устройства и выбрать оптимальный вариант конструкции УВЛДМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горохов, Ю. В. Основы проектирования конструктивных параметров установки непрерывного литья-прессования металлов / Ю. В. Горохов, И. П. Солопко, И. Л. Константинов // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. – 2009. – № 3. – С. 20-23.
2. Одинокоев, В. И. Исследование процесса получения металлоизделий из цветных и черных сплавов на установке вертикального литья и деформации металла / В. И. Одинокоев, В. В. Черномас, Н. С. Ловизин. – Владивосток: Дальнаука, 2011. – 107 с.
3. Одинокоев, В. И. Литейно-ковочный модуль вертикального типа для производства непрерывнолитых деформированных заготовок из железоуглеродистых сплавов / В. И. Одинокоев, В. В. Черномас, Н. С. Ловизин // Обработка металлов. – 2008. – № 2. – С. 10-12.
4. Непрерывное литье-прессование цветных металлов / В. М. Сергеев, Ю. В. Горохов, В. В. Соболев, Н. А. Нестеров. – М.: Металлургия, 1990. – 85 с.
5. Сидельников, С. Б. Применение совмещенных методов прокатки-прессования для получения пресс-изделий из алюминиевых сплавов / С. Б. Сидельников, Н. Н. Довженко, С. Ф. Ворошилов // Технология легких сплавов. – 1999. – № 1-2. – С. 131-136.
6. Черномас, В. В. О формировании непрерывнолитых деформированных заготовок в литейно-ковочном модуле / В. В. Черномас, В. А. Коломин // Металлургия машиностроения. – 2006. – № 4. – С. 35-36.
7. Черномас, В. В. Температурные поля кристаллизатора литейно-ковочного модуля / В. В. Черномас, В. А. Коломин // Металлургия машиностроения. – 2006. – № 4. – С. 37-40.
8. Johann F., Langerweger J., Maddock B. Recent Developments in Conform and Castex // Continuous Extrusion Technology. Light Metal Age. – Aug 1988. – pp. 23-28.

Степаненко В. Е., Фролов Д.Н.

МЕТОД ПРОГНОЗА И ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ АГРЕГАТНОЙ СБОРКИ СТАНДАРТИЗОВАННЫМИ МАТЕРИАЛЬНЫМИ РЕСУРСАМИ

Степаненко В. Е., Фролов Д. Н.

V.E.Stepanenko, D.N.Frolov

МЕТОД ПРОГНОЗА И ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ АГРЕГАТНОЙ СБОРКИ СТАНДАРТИЗОВАННЫМИ МАТЕРИАЛЬНЫМИ РЕСУРСАМИ

A METHOD FOR THE FORECAST AND STATUS ASSESSMENT OF PROCESSES OF MODULAR ASSEMBLAGE SUPPLY WITH STANDARDIZED MATERIAL RESOURCES



Степаненко Виктор Евгеньевич – аспирант кафедры «Информационные системы» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: vices@rambler.ru.

Mr. Victor E. Stepanenko – PhD Candidate, Department of Information Systems, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. E-mail: vices@rambler.ru.



Фролов Дмитрий Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. E-mail: frolov.dnn@mail.ru.

Mr. Dmitry N. Frolov – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Industrial Electronics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. E-mail: frolov.dnn@mail.ru.

Аннотация. Рассмотрена проблема создания имитационных моделей оценки состояния и прогноза, производственных организационно-технических систем, а также систем производственной логистики. На примере системы обеспечения стандартизованным ресурсом показано, как при помощи структурно-функционального анализа и математического аппарата расширенных сетей Петри создать имитационную модель, обеспечивающую поддержку принятия решений при управлении системой снабжения процессов производства.

Summary. The paper considers the problem of creating simulated models of status assessment and forecast, of industrial engineering & management systems, as well as systems of industrial logistics. By the example of a system of standardized resource supply/management, we show how, by means of structure-function analysis and mathematical apparatus of augmented Petri nets, it is possible to create a simulated model providing decision-making support for the management of an industrial supply system.

Ключевые слова: агрегатная сборка, моделирование, прогноз и оценка состояния, расширенные сети Петри.

Key words: modular assemblage, modeling, forecast and status estimation, augmented Petri nets.

УДК 519.876

Жесткие рамки рыночных условий обуславливают потребность в совершенствовании процессов материально-технического снабжения промышленного предприятия. Важными инструментами управления этими процессами являются автоматизированные корпоративные системы. Организация таких систем на предприятии предполагает решение задач трех уровней [1]:

Первый уровень предусматривает обработку, введение учета и хранение информации о запасах;

Второй – предполагает разработку правил принятия решения, на основе которых устанавливаются срок и размер заказа, необходимого для пополнения запасов или их перемещения;

Третий – позволяет на основе разработанных правил принятия решений построить модель системы управления запасами и, в соответствии с этой моделью, определить стратегию функционирования системы на длительную перспективу.

Далее будет описан подход к решению задач третьего уровня. Данный подход основан на использовании имитационной модели, построенной с помощью цветных сетей Петри, предложенных Йенсенем [2]. В качестве примера выбран процесс обеспечения агрегатной сборки стандартизованными деталями. Предполагается, что управление производством осуществляется при помощи ERP (enterprise resource planning) системы со встроенным MRP (Material Requirement Planning) [3] модулем.

Опишем процесс обеспечения агрегатной сборки стандартизованными деталями. Стандартизованные детали – крепежные и соединительные изделия (болты, винты, шайбы и т.п.), изготавливаемые по государственным стандартам, отраслевым нормам и стандартам предприятия. Предприятие, производитель авиационной техники, специализируется на изготовлении среднемагистральных пассажирских авиалайнеров. Сборка основной части фюзеляжа разбита на несколько этапов, на каждом из них производится сборка одного из отсеков (агрегатов). Планирование процессов материально-технического обеспечения производится при помощи ERP-системы. Одним из видов ресурсов, используемых в процессе агрегатной сборки, являются *стандартизованные детали*. Процесс движения подобных ресурсов на предприятии изображен на рис. 1.

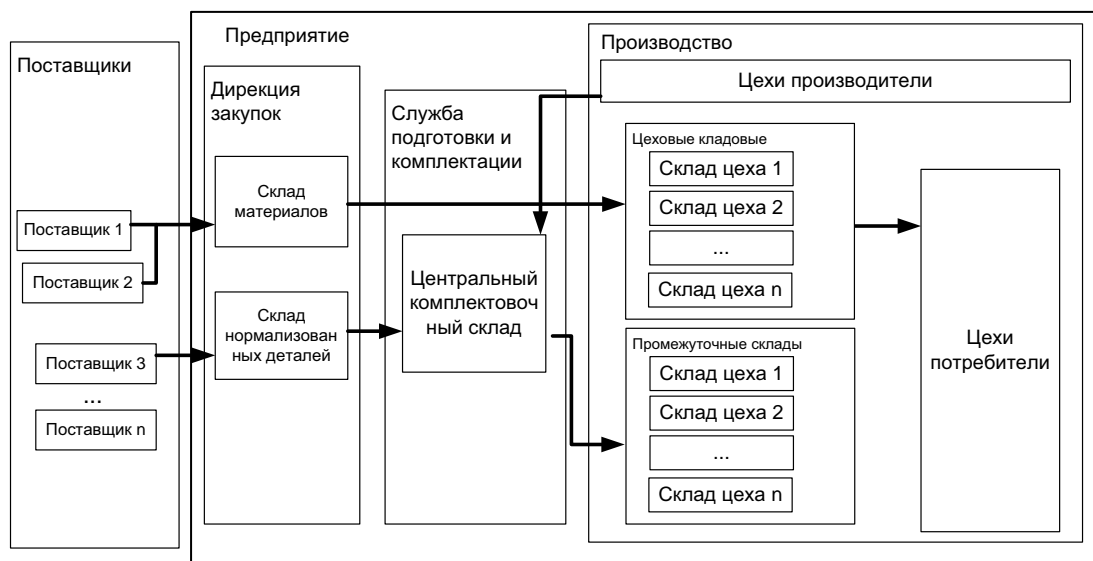


Рис. 1. Схема движения ресурсов

Первым этапом создания модели процесса обеспечения агрегатной сборки является формализованное описание на структурно-функциональном уровне (модель процесса в нотации IDEF0). Результаты анализа позволяют представить процесс обеспечения на системном уровне и сформировать структуру сети (см. рис. 2). Приведем формальное определение расширенной сети Петри, используемой для построения модели. Стоит отметить, что в основу положен математический аппарат, предложенный Йенсенем [2]. Временная цветная сеть Петри есть набор десяти кортежей

$$TCPN = (P, T, A, \Sigma, V, C, G, E, I, D),$$

где $D: T \rightarrow EXPR_d$ – временная функция, выставляющая каждому переходу t пару чисел d_{\min} и d_{\max} .

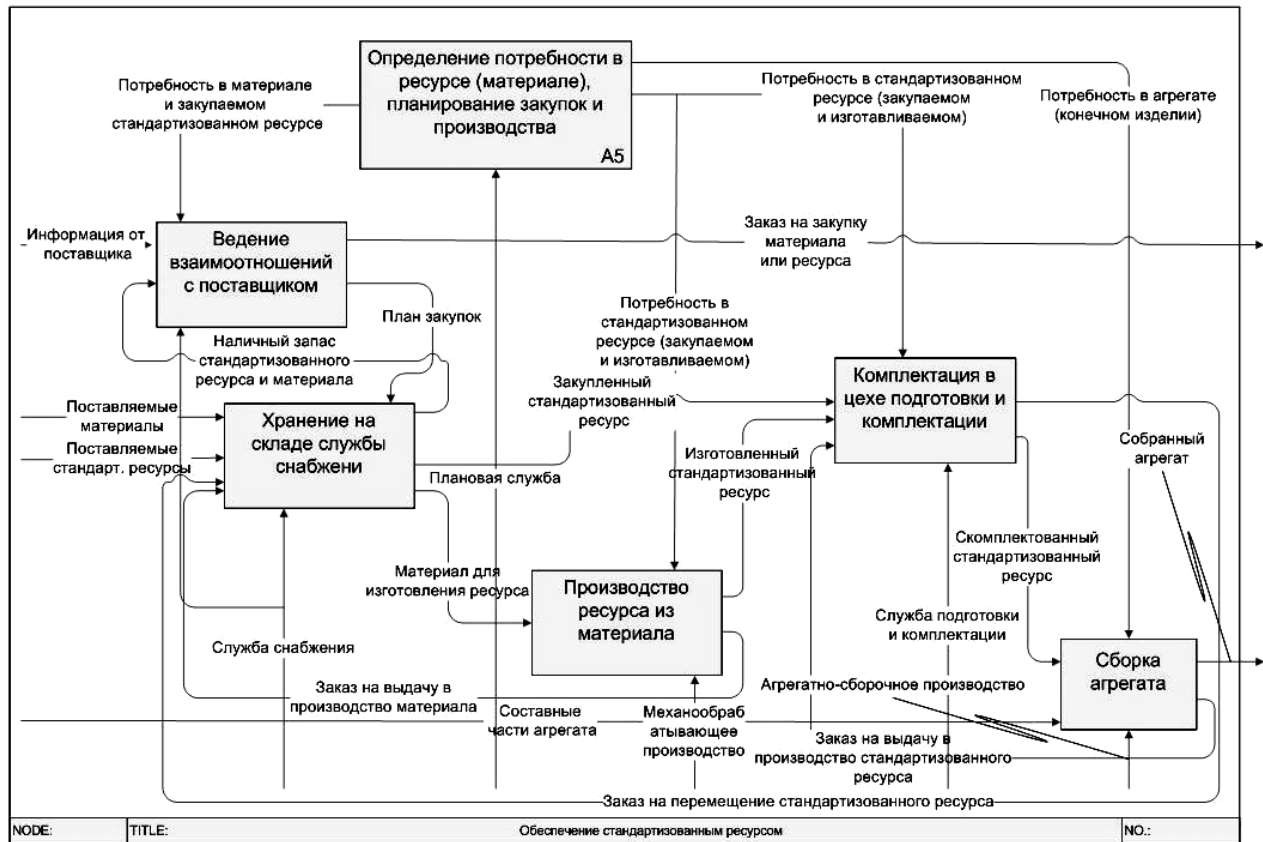


Рис. 2. IDEF0 диаграмма процесса движения стандартизованных деталей

В момент τ , когда переход начинает работать, из каждой входной позиции изымаются фишки в количестве, соответствующем кратности дуги, ведущей из этой позиции к переходу. Время действия перехода длится в пределах интервала $[\tau + d_{\min}, \tau + d_{\max}]$. В момент окончания действия перехода $\tau + d$ во все выходные позиции помещаются фишки в соответствии с кратностью выходных дуг. Время действия d перехода является величиной случайной и формируется в соответствии с заранее определенным правилом. В случае, если во время выполнения перехода возникает необходимость прервать его выполнение, то фишки возвращаются на свои места только по прошествии временного промежутка, равного времени, которое прошло с момента τ до момента прерывания.

Временная цветная сеть Петри с возможностью оценки стоимости моделируемого процесса есть набор

$$TCPN = (P, T, A, \Sigma, V, C, G, E, I, D, X),$$

где $X = \{x_1, x_2, \dots, x_D\}$ – множество векторов x_i с длиной L , каждый из которых ассоциирован с конкретным переходом $t_i \in T$.

Можно представить x_i в виде вектора произведений

$$x_i = \begin{Bmatrix} l_1 \alpha_1^i \\ l_2 \alpha_2^i \\ \dots \\ l_L \alpha_L^i \end{Bmatrix},$$

где l – элемент вектора, характеризующий структуру стоимости действия; α – количество вхождений элемента в вектор (вес элемента).

Таким образом, каждому из переходов $t_i \in T$ ставится в соответствие конкретный комплект величин, характеризующий стоимость его срабатывания.

Пусть работа сети N описывается последовательностью срабатывания $\lambda = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ (n – конечное число) и приводит к появлению разметки M . Тогда стоимость PC достижения разметки M можно определить по формуле $PC = x_1 + x_2 + \dots + x_n$.

Раскроем каждый из элементов формального определения. Модель процесса обеспечения есть набор из 11 кортежей $TCPN = (P, T, A, \Sigma, V, C, G, E, I, D, X)$.

Множество P отражает состояние ресурса (см. табл. 1) на протяжении всего процесса обеспечения.

Таблица 1

Позиции сети Петри

| Позиция | Описание |
|----------|---|
| P_1 | Материал для изготовления стандартизованной детали находится на складе поставщика |
| P_2 | Материал для изготовления стандартизованной детали находится на центральном складе службы снабжения |
| P_3 | Материал для изготовления стандартизованной детали находится в цеховой кладовой в ожидании обработки (изготовления детали) |
| P_4 | Закупаемая стандартизованная деталь находится у поставщика |
| P_5 | Закупаемая стандартизованная деталь находится на центральном складе службы снабжения |
| P_6 | Закупаемые и изготавливаемые детали находятся на складе службы подготовки и комплектации, подготовленные для непосредственного отпуска в производство |
| P_7 | Процесс сборки осуществлен, агрегат собран |
| P_8 | Заказ на изготовление детали создан MRP системой, перемещение материала для осуществления производства разрешено |
| P_9 | Заказ на изготовление детали создан MRP системой, запуск производства разрешен |
| P_{10} | Заказа на изготовление готового изделия от заказчика |
| P_{11} | Заказ на изготовление агрегата сгенерирован MRP системой |
| P_{12} | Заказ на закупку создан MRP системой, перемещение нормали на склад службы подготовки и комплектации разрешено |

Множество T отражает события, происходящие с ресурсом или системой управления (см. табл. 2).

Таблица 2

Переходы сети Петри

| Переход | Описание |
|---------|--|
| I | 2 |
| t_1 | Доставка материала от поставщика до центрального склада службы снабжения |
| t_2 | Перемещение материала со склада поставщика до цеховой кладовой (непосредственно в производство) |
| t_3 | Осуществление изготовления стандартизованной детали из материала, сдача изготовленной детали на склад службы подготовки и комплектации |

| 1 | 2 |
|-------|---|
| t_4 | Доставка стандартизованной детали от поставщика до центрального склада службы снабжения |
| t_5 | Перемещение стандартизованной детали с центрального склада на склад службы снабжения |
| t_6 | Осуществление сборки агрегата |
| t_7 | Запуск MRP системы расчет плановой потребности |

A – конечное множество дуг заданных матрицами инцидентности. Далее будут представлены остальные компоненты сети. Основные конструкции описаны при помощи языка моделирования CPN ML [2] (см. рис 3).

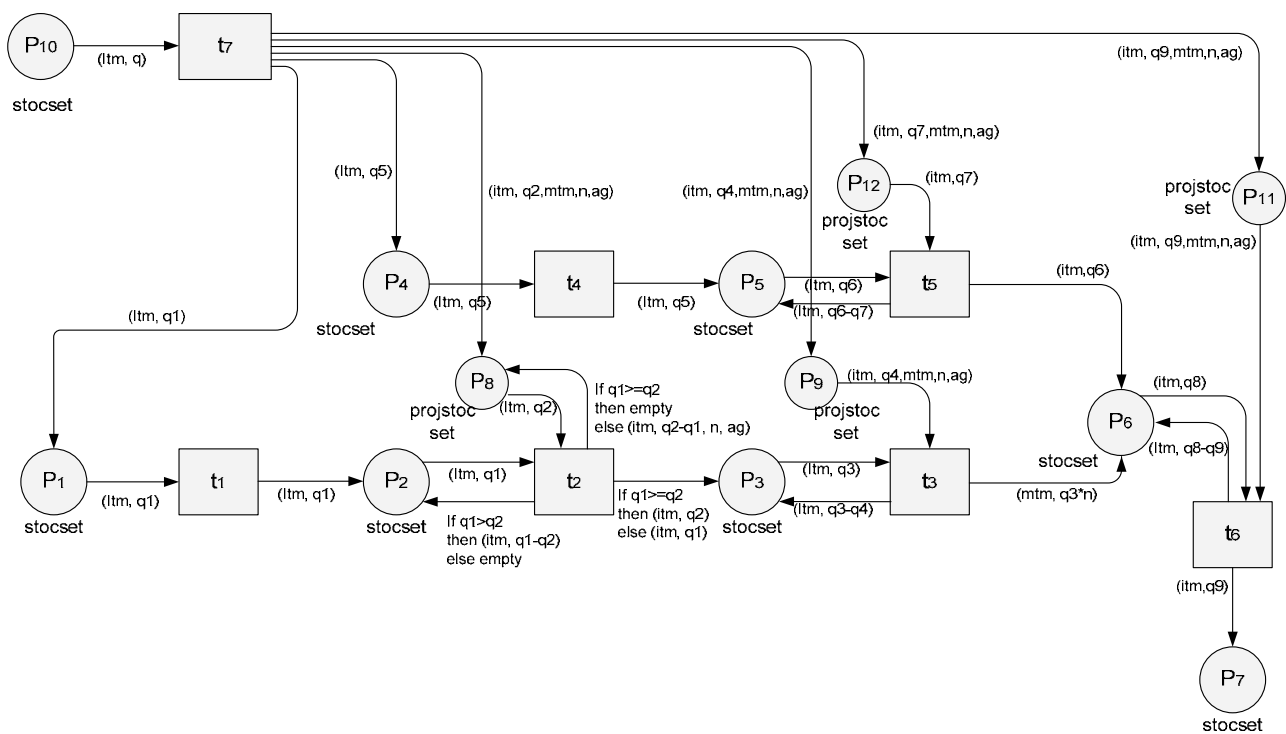


Рис. 3. Структура модели сети Петри

$\Sigma = \{item, quan, mitm, nor, agr, stocset, projstocset\}$ – множество цветных наборов.

$V = \{q:quan, q1:quan, q2:quan, q3:quan, q4:quan, q5:quan, q6:quan, q7:quan, q8:quan, q9:quan, q10:quan, n:nor, itm:item, mtm:mitm, ag:agr\}$ – конечное множество типов переменных.

Функция набора цветов имеет вид:

$$C(p) = \begin{cases} stocset & p \in \{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_{10}\} \\ projstocset & p \in \{P_8, P_9, P_{11}, P_{12}\} \end{cases}$$

Спусковая функция определена как

$$G(t) = \begin{cases} \begin{cases} if & q3 \geq q4 \\ then & true \end{cases} & if & t = t_3 \\ \begin{cases} if & q8 \geq q9 \\ then & true \end{cases} & if & t = t_6 \\ true & for & t \notin \{t_3, t_6\} \end{cases}$$

Функция выражений дуг E показывает преобразования ресурсов и информации об их потребности. Инициализирующая функция I задает начальное состояние модели

$$I(p) = \begin{cases} 1'(itm, q) & \text{if } p = p_{10} \\ 0_{MS} & \text{otherwise} \end{cases}.$$

Здесь переменная itm хранит наименование изделия, которое необходимо изготовить для выполнения заказа, а q хранит заказанное количество. Ограничительные величины d_{\min} и d_{\max} формируются на основе параметров планирования цикла заказа и резервного времени.

Определим структуру вектора стоимости перехода X : l_1 – основные материалы; l_2 – сдельная зарплата; l_3 – повременная зарплата; l_4 – транспортно-заготовительные расходы; l_5 – отчисления по единому социальному налогу и страхование несчастных случаев; l_6 – общепроизводственные расходы; l_7 – амортизация основных средств. Величина α определяется на основании статистических данных.

Опишем место и порядок использования модели в процессе планирования материально-технического снабжения стандартизованными ресурсами процесса агрегатной сборки (см. рис. 4).

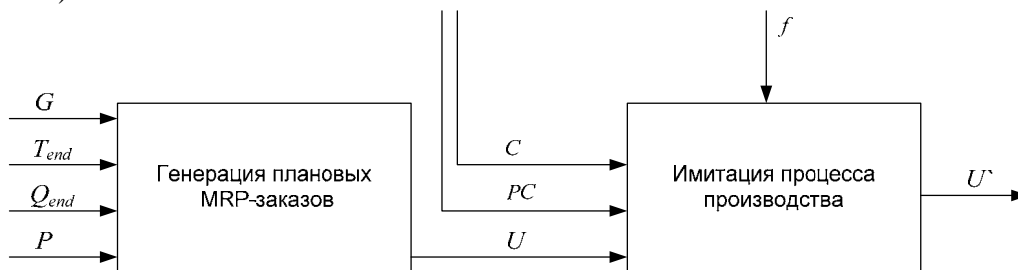


Рис. 4. Использование имитационной модели при планировании производства на основе MRP систем.

Данные о производственном процессе, необходимые для функционирования модели, формируются на основе данных ERP системы предприятия.

1. Входные данные для генерации MRP-заказов:

а) Спецификация конечного изделия, материальные нормы и применяемость компонентов. Формируются службой, отвечающей за конструкторско-технологическую проработку изготавливаемого изделия. В представленной модели спецификация изделия формируется как граф $G = (V, E)$, где V – множество вершин, каждая из которых моделирует изделие; E – множество нагруженных ребер, моделирующих количество вхождений одного изделия в другое (*материальная норма* или применяемость выражается в заранее заданной единице измерения, привязанной каждому из изделий).

б) Плановая дата изготовления. Выражается в качестве константы T_{end} и задается исходя из плана основного производства на базе даты сдачи готового изделия, заранее согласованной с заказчиком.

в) Размер изготавливаемой партии. Выражается в качестве константы Q_{end} и задается исходя из плана основного производства, на базе количества готового изделия, которое необходимо изготовить для заказчика.

г) Параметры планирования. Набор параметров, отражающих условия доставки (закупки) материалов или изготовления компонентов, влияющих на плановую потребность в материале или компоненте. Представляются вектором $P = (p_1, p_2, \dots, p_9)$, где p_1 – интервал заказа; p_2 – минимальный объем; p_3 – максимальный объем; p_4 – цикл заказа; p_5 – резервное время; p_6 – оптимальный объем; p_7 – фиксированный объем; p_8 – пополнение до максимума; p_9 – объем заказа кратен; p_9 – метод заказа.

2. *Выходные данные MRP-алгоритма:* запланированные заказы на закупку материальных ресурсов (дата заказа, заказываемое количество); запланированные заказы на изготовление компонента (дата запуска в производство, изготавливаемое количество).

Запланированный заказ можно представить в виде кортежа: $u = (e, q, t)$, где e – ресурс; q – плановая потребность в изделии; t – дата изготовления. Все заказы можно представить в виде вектора $U = (u_1, u_2, \dots, u_i)$, где i количество компонентов изделий, то есть количество вершин v_i графа G .

3. *Входные данные для имитации процесса производства:*

а) Запланированные заказы U ;

б) Плановая себестоимость компонентов изделия, выраженная в виде вектора $C = (c_1, c_2, \dots, c_i)$.

в) Процент простоя f – величина задается непосредственно перед запуском имитационного алгоритма. Характеризует предполагаемое время простоев, вызванных случайными факторами (поломка оборудования, задержка поставок);

г) Стоимость закупаемых материалов PC , предварительно согласованная с поставщиком, формируется на основе данных из ERP системы, формируемых службой снабжения. Данную величину можно представить в виде вектора $PC = (pc_1, pc_2, \dots, pc_i)$.

4. *Выходные данные имитации процесса производства:*

а) В ходе процесса имитации – состояние процесса производства, отклонение от плановой даты выполнения заказов на закупку или производство U' .

б) После завершения процесса имитации – дата сборки, стоимость партии собранных агрегатов – готовых изделий.

Таким образом, порядок использования имитационной модели состоит в следующем: на основании входных данных производится генерация плана закупок и производства, в результате чего формируется вектор плановых заказов. Затем на основании вектора заказов и других данных о внешней и внутренней среде предприятия запускается процесс имитации, в ходе которого формируется вектор отклонений плановых дат выполнения заказа от фактических.

Предложенный подход позволяет реализовать процесс имитации движения материальных ресурсов (ранее не реализованный) в соответствии с планом закупок и производства, на основании чего руководители производства получают возможность:

- оценить и спрогнозировать состояние плана производства и закупок;
- оценить прогнозируемый наличный запас ресурса;
- оценить стоимость осуществления производственного процесса в разрезе по компонентам себестоимости конечного продукта;
- сформировать наиболее приемлемый набор параметров планирования;
- обеспечить поддержку принятия решений о закупке или производстве материального ресурса;
- определить «узкие места» системы управления материально-техническими ресурсами;
- обеспечить оперативную обратную связь при осуществлении управленческих решений различного уровня;
- оценить эффект от преобразований в организационно-технической системе материально-технического обеспечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов, А. В. Системный анализ : учеб. для вузов / А. В. Антонов. – М.: Высш. шк., 2004.
2. Kurt Jensen. Coloured Petri Nets Modelling and Validation of Concurrent Systems / Kurt Jensen, Lars M. Kristensen. – Springer, 2009.
3. Колесников, С. Н. Производственное и функциональное управление: от MRP к ERP и CSR. Стратегии бизнеса: управление ресурсами и запасами / С. Н. Колесников. – М.: Статус-Кво 97, 2000.

Черномас В. В., Ланкина С. В., Одинокое В. И.
V.V.Chernomas, S.V.Lankina, V.I.Odinokov

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ НА УСТАНОВКЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛА¹

THE PROCESS OF METAL FORMING IN A VERTICAL MOULDING & DEFORMATION PLANT



Черномас Вадим Владимирович – доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: userman10@mail.ru.

Mr.Vadim V. Chernomas – Doctor of Engineering, Associate Professor, Head of a laboratory at the Institute for Machine Engineering and Metallurgy, the Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: userman10@mail.ru



Ланкина Светлана Владимировна – аспирант Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kriza_13@mail.ru.

Ms.Svetlana V. Lankina – PhD Candidate, Institute for Machine Engineering and Metallurgy, the Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kriza_13@mail.ru



Одинокое Валерий Иванович – доктор технических наук, профессор, директор Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mail@imim.ru.

Mr.Valery I. Odinokov - Doctor of Engineering, Professor, Director of the Institute for Machine Engineering and Metallurgy, the Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Komsomolsk-on-Amur).

E-mail: mail@imim.ru

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы, посвященные экспериментальному исследованию деформационных процессов, протекающих в материале заготовки при формировании металлоизделия в кристаллизаторе установки вертикального литья и деформации металла методом делительных сеток.

Summary. The paper considers issues linked to the experimental research of deformation processes proceeding in a billet material during formation of metal items in the crystallizer of a vertical casting and metal deformation plant, using separating meshes.

Ключевые слова: метод делительных сеток, металлоизделия, пластические деформации.

Key words: method of separating meshes, metal items, plastic deformations.

¹ Работа выполнена при поддержке грантов 12-И-П25-02 и 12-И-ОЭММПУ-06.

Введение

Определение оптимальных режимов формирования металлоизделий совмещенным методом непрерывного литья и обработки металла давлением возможно только на основе методов адекватного моделирования процессов, протекающих в кристаллизаторе установки вертикального литья и деформации металла (УВЛДМ). Деформация затвердевающего и твердого металла осуществляется подвижными составными частями кристаллизатора УВЛДМ [2; 3]. Составной кристаллизатор УВЛДМ включает в себя: две боковые стенки, имеющие наклонный участок, на котором осуществляется деформация металла, и калибрующий участок, где формируется профиль заданного поперечного сечения, и две плоские торцевые (передняя и задняя) стенки. Кинематика УВЛДМ организована таким образом, что при повороте приводных эксцентриковых валов стенки кристаллизатора совершают сложное движение, которое приводит к деформации металлоизделия и его самоподачи в зону калибрования в непрерывном режиме. Теоретическое описание процессов деформирования заготовок с использованием разработанного инструмента связано с рядом трудностей, которые возникают при задании схемы деформации, а также определении граничных и начальных условий на поверхностях контакта металлоизделия и инструмента с учетом цикличности процесса. В этой связи возникла необходимость в физическом (натурном) моделировании данного процесса на экспериментальном стенде УВЛДМ. Для проведения физического моделирования процессов пластического формоизменения материалов используются многочисленные методы экспериментального определения напряжений и деформаций. Наряду с методами тензометрирования (струнные тензометры, месдозы), которые используются для определения усилий и напряженно-деформированного состояния материалов в технологиях обработки материалов давлением, широкое распространение получил метод делительных сеток, который является наиболее эффективным при изучении пластического течения материала. Он основан на численном исследовании деформаций координат узлов и размеров ячеек нанесенной на поверхность образца сетки [1; 4].

Методика проведения исследований

Поскольку метод делительных сеток позволяет получить достаточно точные значения величины пластических деформаций только в поверхностных слоях материала, то для оценки напряженно-деформированного состояния во внутренних слоях материала было предложено в качестве объекта исследования выбрать трехслойный составной образец, изготовленный из полос свинцово-сурьмяного сплава марки ССу ГОСТ 1292-81 одинаковой толщины (толщина полосы 3 мм). На сопрягающиеся поверхности каждого из слоев образца наносили координатную сетку в виде продольных и поперечных рисок, глубиной 1 мм, образующих квадратные ячейки размером 10×10 мм. Для предотвращения слипания слоев образца между собой на их контактные поверхности наносили слой индустриального масла марки И-5А ГОСТ 20799-88. Для исключения относительного смещения слоев образца друг относительно друга в процессе деформации их фиксировали между собой свинцовыми заклепками диаметром 5 мм по всему периметру образца. Начальные условия при проведении экспериментальных исследований фиксировались на следующем уровне: температура заготовки перед испытанием – 20 °С, температура инструмента – 20 °С, смазка рабочих поверхностей инструмента, контактирующих с заготовкой, – отсутствует (исходя из технологических требований процесса), расчетная степень деформации образца в калибрующей зоне кристаллизатора – 0,5.

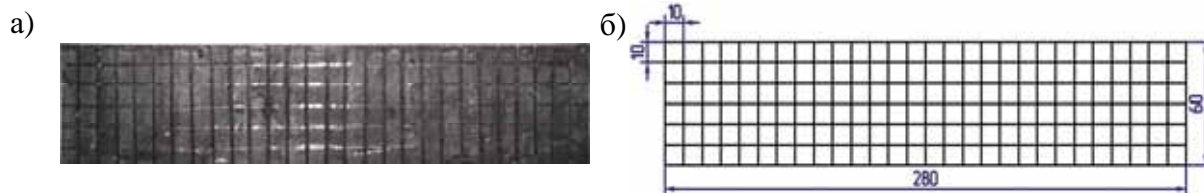


Рис. 1. Внешний вид (а) и схема координатной сетки (б) каждого слоя образца до деформации

На рис. 1 представлены внешний вид каждого из слоев образца и схема координатной сетки, нанесенной на него.

При проведении испытаний образец помещали в кристаллизатор УВЛДМ, боковые стенки которого предварительно устанавливали в положение, соответствующее их максимальному расхождению друг относительно друга. Включали привод составных частей кристаллизатора. Под действием сил тяжести и сил трения, создаваемого между материалом образца и рабочими поверхностями боковых стенок, образец удерживается ими и совместно с торцевыми стенками продвигается в сторону зоны калибрования УВЛДМ, где образец захватывается и деформируется боковыми стенками. После захвата заготовки боковыми стенками торцевые стенки проскальзывают в направлении, противоположном направлению выхода заготовки, и циклы повторяются до полного выхода заготовки из калибрующей зоны кристаллизатора УВЛДМ. После проведения эксперимента образец разделяли по слоям, фотографировали и анализировали изменение координатной сетки, нанесенной на поверхности каждого из слоев. Измерения искажения элементов координатной сетки проводили с помощью программы обработки цифровых изображений «Grafula 3».

Компоненты деформации, которые характеризуют истинные удлинения (укорочения) и сдвиг ячеек координатной сетки, рассчитывали исходя из измерений величины осей вписанных в ячейку координатной сетки эллипсов и углов поворота этих осей относительно исходной (до деформации) координатной сетки [3].

Результаты исследования

На рис. 2 представлены внешний вид и схема координатной сетки среднего слоя составного образца.

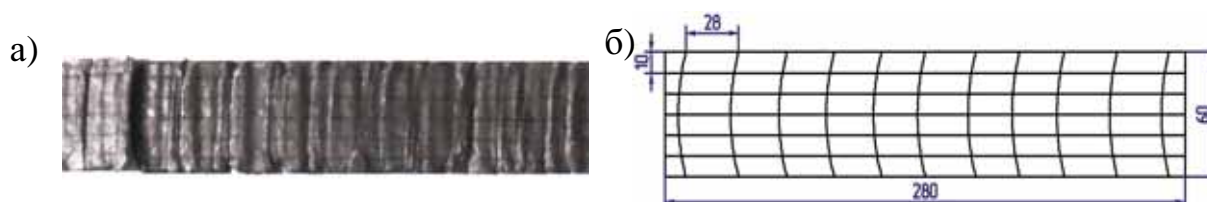


Рис. 2. Внешний вид (а) и схема координатной сетки (б) среднего слоя образца после деформации

В связи с тем, что кристаллизатор УВЛДМ имеет две плоскости симметрии (продольную и поперечную) и процесс деформирования металлоизделия осуществляется циклически с шагом подачи 20 мм, измерение искажений сетки образца проводили для двух поперечных рядов ячеек, ограниченных продольной линией симметрии образца и тремя поперечными линиями, характеризующими шаг подачи металлоизделия (см. рис. 3).



Рис. 3. Схема расположения ячеек координатной сетки

В табл. 1 представлены результаты измерений искажений сетки и расчет компонент деформации. Расстояние между продольными линиями сетки остались практически неизменными (максимальное отклонение составило 0,25 мм), что свидетельствует о незначительной величине истинных удлинений (укорочений) ϵ_2 . Поперечные линии сетки претерпели существенное изменение и приобрели вид параболы с вершиной, находящейся на оси симметрии заготовки. Если пренебречь величиной ϵ_2 , то схему деформации образца в калибрующей части можно представить как результат преобладающего действия удлинения с дополнительным сдвигом.

Таблица 1

Результаты измерений и расчетов

| Номер ячейки | Начальный радиус вписанного круга r_0 , мм | Большая полуось эллипса r_1 , мм | Угол поворота осей эллипса, град. | Малая полуось эллипса r_2 , мм | Компоненты деформации | | |
|--------------|--|------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|--------------|--------|
| | | | | | ϵ_1 | ϵ_2 | τ |
| 1 | 5 | 13 | 4 | 5 | 0,9556 | 0 | 0,0699 |
| 2 | 5 | 13 | 15 | 4,5 | 0,9556 | 0,1054 | 0,2679 |
| 3 | 5 | 15 | 26 | 4,8 | 1,0986 | 0,0408 | 0,4877 |
| 4 | 5 | 13 | 2 | 5 | 0,9556 | 0 | 0,0349 |
| 5 | 5 | 14 | 12 | 4,8 | 1,0296 | 0,0408 | 0,2125 |
| 6 | 5 | 15 | 21 | 4,5 | 1,0986 | 0,1054 | 0,3839 |

Выводы

С помощью экспериментального метода координатных делительных сеток установлены компоненты деформации и картина распределения деформаций, происходящих в материале заготовки при формировании металлоизделия в кристаллизаторе УВЛДМ. Общая деформация увеличивается по мере удаления от оси симметрии образца (вследствие дополнительных сдвигов), где преобладает чистое вытягивание. Сдвиговые деформации τ также растут от центра к периферии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дель, Г.Д. Метод делительных сеток / Г. Д. Дель, Н. А. Новиков. – М.: Машиностроение, 1979. – 144 с.
2. Одинокоев, В. И. Исследование процесса получения металлоизделий из цветных и черных сплавов на установке вертикального литья и деформации металла / В. И. Одинокоев, В. В. Черномас, Н. С. Ловизин. – Владивосток: Дальнаука, 2011. – 107 с.
3. Одинокоев, В. И. Теоретическое и экспериментальное исследование непрерывного процесса кристаллизации металла при одновременном его деформировании / В. И. Одинокоев, Б. И. Проскуряков, В. В. Черномас. – М.: Наука, 2006. – 111 с.
4. Фридман, Я. Б. Изучение пластической деформации и разрушения методом накатанных сеток / Я. Б. Фридман, Т. К. Зилова, Н. И. Демина. – М.: ОБОРОНГИЗ, 1962. – 188 с.



Привалова В. В., Стружанов В. В.
V.V.Privalova, V.V.Struzhanov

НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ УПРУГОХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ В ХОДЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО РАСТЯЖЕНИЯ

SOME CONSISTENT PATTERN OF ELASTIC-BRITTLE MATERIALS PROPERTIES CHANGE IN THE CYCLIC EXTENSION TIME

Привалова Валентина Викторовна – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института машиноведения Уральского отделения Российской академии наук (Россия, Екатеринбург). E-mail: valentprival@gmail.ru.

Ms. Valentina V. Privalova – PhD in Physics and Mathematics, Research Fellow, Institute of Engineering Science, the Urals Branch of Russian Academy of Sciences (Yekaterinburg). E-mail: valentprival@gmail.ru.

Стружанов Валерий Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института машиноведения Уральского отделения Российской академии наук (Россия, Екатеринбург). E-mail: stru@imach.uran.ru.

Mr. Valeriy V. Struzhanov - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Chief Researcher, Institute of Engineering Science, the Urals Branch of Russian Academy of Sciences (Yekaterinburg). E-mail: stru@imach.uran.ru.

Аннотация. В данной работе приведена одна из возможных моделей деградации свойств упруго-хрупкого материала и вырождения диаграммы квазистатического растяжения. Модель основана на изменении плотности вероятности распределения предельных значений деформаций структурных элементов упруго-хрупкого материала в ходе циклирования. При этом изменяется не только вид функции плотности распределения (на первом этапе циклирования), но и изменяется (в сторону уменьшения) область определения этой функции.

Summary. The paper suggests a possible degradation model of the elastic-brittle material properties and de-generation of the quasistatic extension diagram. This model is based on the changing of distribution probability density of deformation limit values of structural elements for elastic-brittle material in the cycling time. In this case both the distribution probability density function type (at first period cycling) and the range of definition for this function (to decrease side) are transformed.

Ключевые слова: упруго-хрупкий, циклирование, квазистатическое растяжение, плотность вероятности распределения предельных значений деформаций.

Key words: elastic-brittle, cycling, quasistatic extension, distribution probability density of deformation limit values.

УДК 593.3

Введение. В феноменологических теориях при построении определяющих соотношений используются результаты макроэксперимента по деформированию образцов материала. Полученные в эксперименте свойства рассматриваются как интегральное отображение процессов, происходящих на микроуровне, без раскрытия структурных механизмов их формирования. Существуют структурные модели [1; 2; 3], позволяющие, по крайней мере, на качественном уровне прогнозировать свойства материала. Возможна и обратная задача о построении структурной модели исходя из результатов макроэксперимента. В этом случае реальному материалу ставится в соответствие его модельное представление. Тогда свойства упруго-хрупкого материала возможно описать одной функцией, а именно: плотностью распределения пределов прочности (деформаций, отвечающих пределам прочности) структурных элементов материала.

В случае циклического нагружения (растяжением) плотность распределения пределов прочности изменяется, что приводит к изменению квазистатической диаграммы деформи-

вания, то есть наблюдается вырождение этой диаграммы и, следовательно, имеет место деградация свойств (при квазистатическом деформировании) материала.

Данная работа посвящена построению структурной модели упругохрупкого материала по результатам макроэксперимента на квазистатическое растяжение и определение на качественном уровне деградации свойств в ходе циклического нагружения.

Плотность распределения пределов прочности упругохрупкого материала при квазистатическом растяжении. Макроэксперимент на одноосное растяжение элемента материала в условиях жёсткого нагружения позволяет построить полную диаграмму деформирования $\sigma(\varepsilon)$ [5]. По ней определяется касательный модуль $E^p(\varepsilon) = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ и секущий модуль

$E^s(\varepsilon) = \frac{\sigma}{\varepsilon}$, который для упругохрупкого материала является и модулем разгрузки. Повреждённость материала, связанная с континуальным разрушением, вычисляется по формуле [6]

$$\omega = 1 - \frac{E^s}{E}, \quad (1)$$

где E – модуль Юнга.

Построим структурную модель упругохрупкого материала, взяв за основу модифицированную модель Мазинга [4]. Допустим, что материал состоит из совокупности упругохрупких подэлементов (микроэлементов). Деформация разрушения (или пределы прочности), которая распределена по некоторому закону с плотностью распределения $f_1(\varepsilon)$, заданному на отрезке $[\varepsilon^t, \varepsilon^z]$. Здесь $\varepsilon^t, \varepsilon^z$ – деформации соответственно предела пропорциональности и разрушения, полученные в макроэксперименте. Тогда повреждённость определяется относительным содержанием разрушенных подэлементов, то есть

$$\omega = \int_{\varepsilon^t}^{\varepsilon} f_1(\varepsilon) d\varepsilon.$$

Отсюда, используя равенство (1), находим, что

$$\begin{aligned} f_1(\varepsilon) &= \frac{d\omega}{d\varepsilon} = \frac{d}{d\varepsilon} \left(1 - \frac{E^s}{E} \right) = -\frac{1}{E} \frac{dE^s}{d\varepsilon} = \\ &= -\frac{1}{E} \frac{d}{d\varepsilon} \left(\frac{\sigma}{\varepsilon} \right) = -\frac{1}{E} \frac{d\sigma/d\varepsilon * \varepsilon - \sigma}{\varepsilon^2} = \frac{E^s(\varepsilon) - E^p(\varepsilon)}{E\varepsilon}. \end{aligned} \quad (2)$$

Полученная функция обладает всеми свойствами плотности распределения. Действительно, при $\varepsilon < \varepsilon^t$ касательный и секущий модули равны модулю Юнга и, следовательно, функция $f_1(\varepsilon) = 0$; при $\varepsilon > \varepsilon^z$ имеем $E^s = E^p = 0$ и снова $f_1 = 0$. Итак, вне отрезка $[\varepsilon^t, \varepsilon^z]$ плотность распределения равна нулю. Внутри отрезка функция f_1 положительна, так как $E^s > E^p$, и

$$\int_{\varepsilon^t}^{\varepsilon^z} f_1(\varepsilon) d\varepsilon = \int_{\varepsilon^t}^{\varepsilon^z} \left(\frac{d\omega}{d\varepsilon} \right) d\varepsilon = \omega(\varepsilon^z) - \omega(\varepsilon^t) = 1,$$

Так как $\omega(\varepsilon^z) = 1$, $\omega(\varepsilon^t) = 0$.

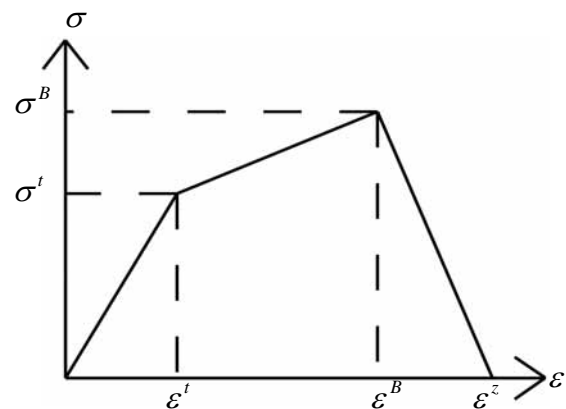


Рис. 1. Кусочно-линейная диаграмма растяжения

Таким образом, реальному материалу ставится в соответствие модельный материал, состоящий из совокупности хрупких подэлементов. Свойства модельного материала определяет одна функция, а именно: плотность распределения предельных деформаций подэлементов [6], вычисленная по формуле (2), в которой используются результаты макроэксперимента.

В качестве примера рассмотрим материал, обладающий кусочно-линейной диаграммой растяжения с линейными восходящей и падающей ветвями (см. рис. 1):

$$\sigma_a(\varepsilon) = \begin{cases} E\varepsilon, & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon^t; \\ \sigma^t + E_h^p(\varepsilon - \varepsilon^t), & \varepsilon^t \leq \varepsilon \leq \varepsilon^B; \\ \sigma^B + E_s^p(\varepsilon - \varepsilon^B), & \varepsilon^B \leq \varepsilon \leq \varepsilon^z, \end{cases}$$

где $\sigma^t = E\varepsilon^t$ – предел пропорциональности; $E_h^p = \frac{\sigma^B - \sigma^t}{\varepsilon^B - \varepsilon^t} = \frac{E(\gamma - 1)}{\alpha - 1}$ – модуль упрочнения; $\varepsilon^B = \alpha\varepsilon^t$, $\sigma^B = \gamma\sigma^t$ – соответственно деформация и предел прочности ей соответствующий; $\sigma^z = 0$, $\varepsilon^z = z\varepsilon^B = z\alpha\varepsilon^t$; $E_s^p = -\frac{\sigma^B}{\varepsilon^z - \varepsilon^B} = -\frac{E\gamma}{\alpha(z-1)}$ – модуль разупрочнения; $z, \alpha, \gamma > 1$; $\alpha > \gamma$.

Отсюда

$$E^s = \begin{cases} E, & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon^t; \\ \frac{E}{\alpha - 1} \left[(\gamma - 1) + (\alpha - \gamma) \frac{\varepsilon^t}{\varepsilon} \right], & \varepsilon^t \leq \varepsilon \leq \varepsilon^B; \\ \frac{\gamma E}{z - 1} \left[-\frac{1}{\alpha} + \frac{z\varepsilon^t}{\varepsilon} \right], & \varepsilon^B \leq \varepsilon \leq \varepsilon^z. \end{cases}$$

Теперь по формуле (2) находим, что

$$f_1(\varepsilon) = \begin{cases} f_1', & \varepsilon^t \leq \varepsilon \leq \varepsilon^B; \\ f_1'', & \varepsilon^B \leq \varepsilon \leq \varepsilon^z, \end{cases}$$

где $f_1' = \frac{(\alpha - \gamma)\varepsilon^t}{(\alpha - 1)\varepsilon^2}$; $f_1'' = \frac{z\gamma\varepsilon^t}{z\varepsilon^2}$.

Вне отрезка $[\varepsilon^t, \varepsilon^z]$ функция f_1 равна нулю. Площадь, ограниченная двумя кривыми f_1' и f_1'' , составляет величину

$$\int_{\varepsilon^t}^{\varepsilon^z} f_1(\varepsilon) d\varepsilon = \int_{\varepsilon^t}^{\varepsilon^B} f_1'(\varepsilon) d\varepsilon + \int_{\varepsilon^B}^{\varepsilon^z} f_1''(\varepsilon) d\varepsilon = \frac{\alpha - \gamma}{\alpha} + \frac{\gamma}{\alpha} = 1.$$

Качественный вид функции $f_1(\varepsilon)$ изображён на

рис. 2, где $a = \frac{\alpha - \gamma}{(\alpha - 1)\varepsilon^t}$, $b = \frac{\alpha - \gamma}{\alpha^2(\alpha - 1)\varepsilon^t}$,

$$c + b = \frac{\gamma z}{\alpha^2(\alpha - 1)\varepsilon^t}, \quad d = \frac{\gamma}{z\alpha^2(\alpha - 1)\varepsilon^t}.$$

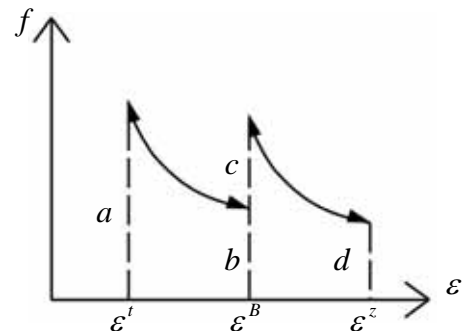


Рис. 2. Плотность распределения предельных деформаций подэлементов модельного материала, отвечающего реальному упругохрупкому материалу с кусочно-линейной диаграммой

Деграция свойств при циклическом растяжении. Зададим для примера плотность распределения деформаций, отвечающих пределам прочности компонент материала, в виде:

$$f(\varepsilon) = \begin{cases} \frac{h}{\varepsilon^* - \varepsilon^t} (\varepsilon - \varepsilon^t), & \varepsilon^t \leq \varepsilon \leq \varepsilon^*; \\ \frac{h}{\varepsilon^z - \varepsilon^*} (\varepsilon^t - \varepsilon), & \varepsilon^* \leq \varepsilon \leq \varepsilon^z, \end{cases}$$

где $h = 2/(\varepsilon^z - \varepsilon^t)$; ε^z и ε^t – деформации разрушения самых прочных и самых слабых элементов структуры, $\varepsilon^t \leq \varepsilon^* \leq \varepsilon^z$. Непосредственно проверяется, что $\int_{\varepsilon^t}^{\varepsilon^z} f_1(\varepsilon) d\varepsilon = 1$. График функции $f(\varepsilon)$ изображён на рис. 3.

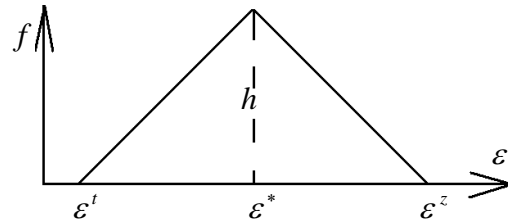


Рис. 3. Плотность распределения $f(\varepsilon)$

Введём параметр t , который может иметь смысл непрерывного времени или целочисленного количества циклов нагружения. Пусть в начальный момент процесса циклирования $t=0$, $\varepsilon^*|_{t=0} = \varepsilon_0^* = 0,05$, а величины $\varepsilon^t|_{t=0} = \varepsilon_0^t = 0,01$, $\varepsilon^z|_{t=0} = \varepsilon_0^z = 0,06$. Тогда, используя модель Мазинга растяжения пучка, находим, что диаграмма растяжения имеет вид кривой 1 на рис. 4. При её построении модуль Юнга $E = 2 \cdot 10^4$ кГ/мм², $G = E(1 - \omega(\varepsilon))\varepsilon$, $\omega = \int_{\varepsilon^t}^{\varepsilon} f_1(\varepsilon) d\varepsilon$.

На первом этапе циклирования изменяется соотношение прочных и слабых элементов внутри отрезка $[\varepsilon_0^t, \varepsilon_0^z]$, которое отражается в изменении плотности вероятности. Характер этого изменения зависит от параметров циклического нагружения (величина нагрузки циклирования или циклического перемещения, вида цикла – отнулевой, симметричный и т.п.). Свяжем указанное изменение плотности вероятности с изменением параметра ε^* . Пусть величина ε^* уменьшается на первом этапе циклирования от ε_0^* до ε_0^t по некоторому закону, зависящему от параметра t , который за время первого этапа изменяется от 0 до значения t_1 , определяемого экспериментально. В рассмотренном примере закон изменения $\varepsilon^*(t)$ был взят в виде:

$$\varepsilon^* = \frac{\varepsilon_0^t - \varepsilon_0^*}{t_1} t + \varepsilon_0^*.$$

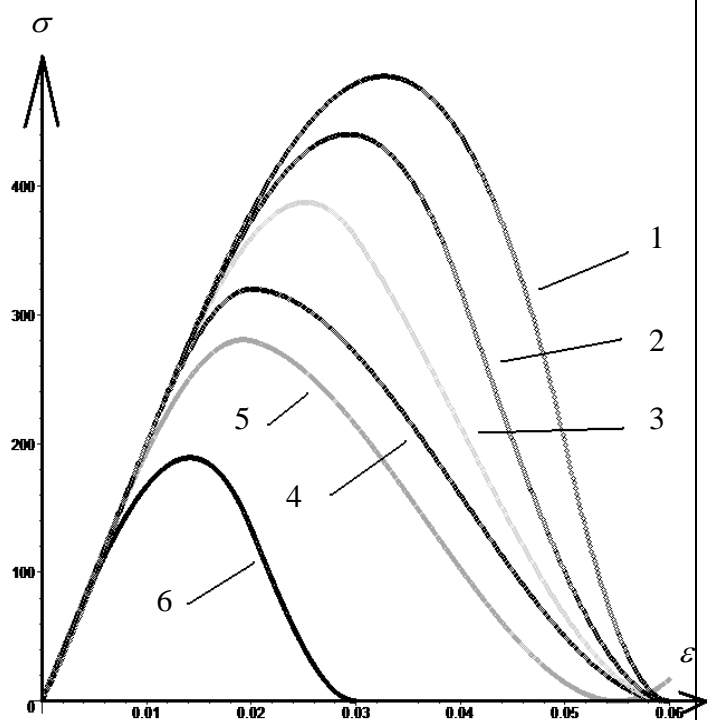


Рис. 4. Вырождение полной диаграммы на трёх этапах циклирования.

На этом этапе плотность распределения деформаций записывается в виде:

$$f(\varepsilon) = \begin{cases} \frac{h_0}{\varepsilon_0^* - \varepsilon_0^t} (\varepsilon - \varepsilon_0^t), & \varepsilon_0^t \leq \varepsilon \leq \varepsilon_0^*; \\ \frac{h_0}{\varepsilon_0^z - \varepsilon_0^*} (\varepsilon_0^* - \varepsilon), & \varepsilon_0^* \leq \varepsilon \leq \varepsilon_0^z, \end{cases}$$

где $h_0 = 2/(\varepsilon_0^z - \varepsilon_0^t)$.

Тогда при $\varepsilon^* = 0,04$ получаем диаграмму 2, при $\varepsilon^* = 0,03$ – диаграмму 3, при $\varepsilon^* = 0,02$ – диаграмму 4 (см. рис. 4). Таким образом, полная диаграмма растяжения вырождается при увеличении числа циклов нагружения. В конце первого этапа ε^* становится равным ε^t .

На втором этапе циклирования происходит изменение (уменьшение) предельных деформаций структурных элементов. Это отражается в параллельном сдвиге границ отрезка $[\varepsilon^t, \varepsilon^z]$ влево, то есть ε^t уменьшается от ε_0^t до ε_1^t , а ε^z уменьшается от ε_0^z до ε_1^z , то есть прочность всех волокон падает. Запишем законы изменения ε^t и ε^z от параметра t , который за время второго этапа изменяется от t_1 до значения t_2 , определяемого экспериментально в следующем виде:

$$\varepsilon^t = \frac{\varepsilon_0^t - \varepsilon_1^t}{t_1 - t_2} t + \frac{\varepsilon_1^t t_1 - \varepsilon_0^t t_2}{t_1 - t_2}, \quad \varepsilon^z = \frac{\varepsilon_0^z - \varepsilon_1^z}{t_1 - t_2} t + \frac{\varepsilon_1^z t_1 - \varepsilon_0^z t_2}{t_1 - t_2}.$$

На этом этапе плотность распределения деформаций (с учётом равенства $\varepsilon^* = \varepsilon^t$) записывается в виде:

$$f(\varepsilon) = \frac{h_1}{\varepsilon_1^z - \varepsilon_1^t} (\varepsilon_1^t - \varepsilon), \quad \varepsilon_1^t \leq \varepsilon \leq \varepsilon_1^z,$$

где $h_1 = 2/(\varepsilon_1^z - \varepsilon_1^t)$.

Пусть после некоторого числа циклов нагружения на втором этапе отрезок $[\varepsilon^t, \varepsilon^z]$ стал равным $[0,005; 0,055]$. Соответствующая кривая деформирования показана на рис. 4 (кривая 5).

На третьем этапе циклирования отрезок $[\varepsilon^t, \varepsilon^z]$ начинает сжиматься, то есть значение ε^t остаётся равным ε_1^t , а значение ε^z уменьшается от ε_1^z до ε_2^z .

По окончании третьего этапа отрезок $[0,005; 0,055]$ сжимается до отрезка $[0,0001; 0,03]$. Закономерность $\varepsilon^z(t)$ на данном этапе при изменении времени от t_2 до значения t_3 , определяемого экспериментально, имеет вид:

$$\varepsilon^z = \frac{\varepsilon_1^z - \varepsilon_1^t}{t_2 - t_3} t + \frac{\varepsilon_1^t t_2 - \varepsilon_1^z t_3}{t_1 - t_2}.$$

На этом этапе плотность распределения деформаций записывается в виде:

$$f(\varepsilon) = \frac{h_2}{\varepsilon_2^z - \varepsilon_1^t} (\varepsilon_2^z - \varepsilon), \quad \varepsilon_1^t \leq \varepsilon \leq \varepsilon_2^z,$$

где $h_1 = 2/(\varepsilon_2^z - \varepsilon_1^t)$.

Соответствующая кривая деформирования показана на рис. 4 (кривая б). Ясно, что деградация свойств материала продолжается.

Итак, механизм деградации (вырождения статической полной диаграммы растяжения упругохрупкого материала) связан с изменением, во-первых, плотности вероятности распределения деформаций разрушения структурных элементов, во-вторых, с уменьшением величин этих деформаций в результате циклирования и, следовательно, величины и расположения отрезка, на котором задаётся функция плотности распределения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 10-01-96018).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Гохфельд, Д. А. Пластичность и ползучесть элементов конструкций при повторном нагружении / Д. А. Гохфельд, О. С. Саадаков. – М.: Машиностроение, 1984. – 256 с.
2. Новожилов, В. В. Микронапряжения в конструкционных материалах / В. В. Новожилов, Ю. И. Кадашев. – Л.: Машиностроение, 1990. – 223 с.
3. Радченко, В. П. Структурная модель закритического упругопластического деформирования материалов / В. П. Радченко, Е. В. Небогина, М. В. Басов // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: физ.-мат. науки. – 2009. – № 9. – С. 55 – 65.
4. Стружанов, В. В. Модифицированная модель Мазинга / В. В. Стружанов, В. В. Башуров // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: физ.-мат. науки. – 2007. – № 1 (11). – С. 29 – 39.
5. Стружанов, В. В. Определение инкрементальных модулей по результатам испытаний на растяжение с построением полной диаграммы / В. В. Стружанов // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: физ.-мат. науки. – 2008. – № 1(16). – С. 160 – 163.
6. Стружанов, В. В. Свойства разупрочняющихся материалов и определяющие соотношения при одноосном напряжённом состоянии / В. В. Стружанов // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: физ.-мат. науки. – 2007. – № 2 (15). – С. 69 – 78.



Сапченко И. Г., Жилин С. Г., Комаров О. Н., Абашкин Е. Е.
I.G.Sapchenko, S.G.Zhilin, O.N.Komarov, E.E.Abashkin

СВОЙСТВА СВАРНОГО ШВА, ПОЛУЧЕННОГО ИЗ ТЕРМИТНОЙ ШИХТЫ

PROPERTIES OF A WELD JOINT PRODUCED BY A THERMITE CHARGE



Сапченко Игорь Георгиевич – доктор технических наук, доцент, ученый секретарь Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681005, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1. E-mail: mail@imim.ru

Mr. Igor G. Sapchenko – Doctor of Engineering, Associate Professor, Academic Secretary of the Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mail@imim.ru



Жилин Сергей Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681005, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1.

Mr. Sergey G. Zhilin – PhD in Engineering, Associate Professor, Senior Research Fellow at the Institute for Machine Engineering and Metallurgy of the Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: zhilin@imim.ru



Комаров Олег Николаевич – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681005, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1. E-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru

Mr. Oleg N. Komarov – PhD in Engineering, Senior Research Fellow Senior Research Fellow at the Institute for Machine Engineering and Metallurgy of the Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru

Абашкин Евгений Евгеньевич – младший научный сотрудник Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681005, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1. E-mail: mail@imim.ru

Mr. Evgeny E. Abashkin – Junior Researcher at the Institute for Machine Engineering and Metallurgy of the Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mail@imim.ru

Аннотация. В работе приведены результаты исследований свойств термитного сварного шва и определения возможности применения технологии для получения изделий, эксплуатируемых в условиях высоких температур. Получены сварные швы из термитного металла; исследована структура зоны сварного соединения; определены микротвердость зоны сварного шва и удельное изменение массы сварных швов из термитной стали в сравнении с использованием электродной проволоки марки 09Г2С.

Summary. The paper presents the results of a study of properties of a thermite weld and determination of the applicability of this technology to manufacture of products that are operated at high temperatures. The welds were made of thermite metal; the structure of the weld zone was studied; micro hardness of the weld zone was determined, specific mass variation of thermite steel welds and the welds made with the 09G2S electrode wire was established.

Ключевые слова: термитная шихта, экзотермическая реакция, сварной шов, восстановление, выход годного.

Key words: thermite charge, exothermic reaction, weld joint, recovery, yield.

УДК 621.74.04

Приоритетным направлением в развитии новых технологий является повышение технологических параметров производства использованием вторичного сырья. Применение алюмотермитного процесса получения жидкого металла в производстве соответствует этим требованиям, так как в состав шихты входят порошки железной окалины и алюминия, являющиеся отходами производства, переработка которых традиционными технологиями неэффективна. Теплотворная способность термитной шихты при восстановлении железа в ходе алюмотермитной реакции определяет эффективность ее применения в сварочном производстве.

Сварка с применением алюмотермии позволяет значительно снизить затраты энергии и материалов при организации производства, особенно в неприспособленных условиях.

В существующих методах применения алюмотермии используется косвенный нагрев для оплавления и соединения (сваривания) металлических деталей теплом восстановительного процесса экзотермической реакции, либо заливкой шовного пространства большим количеством термитного металла с целью оплавления свариваемых элементов конструкции [2]. Использование термитного порошка в формировании сварного соединения металлических элементов конструкций ранее не применялось.

Традиционная технология получения сварного соединения состоит в плавлении соединяемых деталей и электрода под действием источника тепла. Края свариваемых металлических заготовок расплавляются в месте соединения, образуя сварочную ванну. В результате физико-химических взаимодействий, происходящих в этой ванне при охлаждении, по мере удаления источника тепла, металл кристаллизуется, образуя сварной шов, соединяющий заготовки. Как правило, сваркой соединяют металлические заготовки, полученные в результате пластической деформации (прокатки,ковки,штамповки) с измельченным зерном в структуре. Металл в зоне сварного шва имеет литую структуру с укрупненным зерном, химический состав и свойства которого отличны от свариваемых заготовок [1, 2].

Структура и свойства металла шва и зоны термического влияния в электродуговой сварке неоднородны, что приводит к возникновению напряжений в получаемом соединении и значительно снижает работоспособность конструкции. Снижение неоднородности и, как следствие, напряженно-деформированного состояния (НДС) в производственной практике достигается последующей термической обработкой сварного соединения, что не всегда осуществимо и целесообразно. В зоне сварного шва нередко присутствуют простые и сложные по структуре неоднородные включения. Эти включения являются концентраторами напряжений и могут стать причиной разрушения металла. Наиболее опасны не поддающиеся деформациям хрупкие и твердые включения.

Таким образом, целью настоящего исследования являлось изучение эксплуатационных свойств получаемого термитного сварного шва и определение возможности применения данной технологии для получения изделий, эксплуатируемых в условиях высоких температур [1, 3]. В рамках поставленной цели решены следующие задачи: получение сварного шва из термитного металла; исследование макро- и микроструктуры зоны сварного соединения; определение микротвердости зоны сварного шва, определение удельного изменения массы сварных швов из термитной стали в сравнении с использованием электродной проволоки марки 09Г2С.

Процесс получения сварного шва осуществлялся использованием проволоки с алюмотермитным наполнителем.

В качестве алюмотермита применяется мелкодисперсная смесь железной окалины, алюминия и лигатур. Одним из продуктов проходящей термитной реакции является восстановленный металл, выход которого, согласно экспериментальным данным, составляет более 50 %. Подготовка термитной смеси, включающая сепарацию и прогрев ее компонентов, технологически позволяет увеличить выход восстановленного металла, что оказывает влияние на увеличение протяженности и повышение качества сварного шва из термитного металла.

Сварное соединение, представленное на рис. 1, получено в результате применения алюмотермии с химическим составом термитной шихты, идентичным металлу свариваемой детали. Такое соединение можно разделить на три основные зоны, имеющие различную структуру: зону основного металла 2; зону термического влияния 1 и зону наплавленного металла 3. В зоне термического влияния, расположенной рядом со швом в основном металле, под действием тепла происходят структурные изменения.

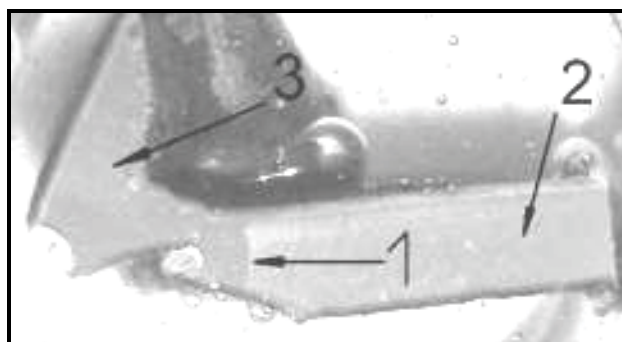


Рис. 1. Внешний вид образца термитной сварки:
1 – зона соединения; 2 – сталь марки Ст3; 3 – термитный металл

Исследованиями установлено, что термитная сталь, получаемая при сгорании металлотермической шихты, имеет в среднем 0,1 % С, 0,3 % Si, 0,2 % Mn, 0,01 % P и 0,01 % S. При определенном наборе эксплуатационных свойств термитная сталь может быть использована как электродный металл [3].

Исследованиями структуры образцов сварных соединений и восстановленного металла (термитной стали) определено, что:

- структура термитной стали представляется в виде четких однородных больших зерен, что позволяет отнести её к ферритным сталям;
- в зоне соединения трёх зерен углы, представленные на рис. 2, преимущественно равны 120° , что позволяет судить об отсутствии внутренних напряжений в структуре шва и завершении релаксационных процессов в металле или наличии равновесного НДС.

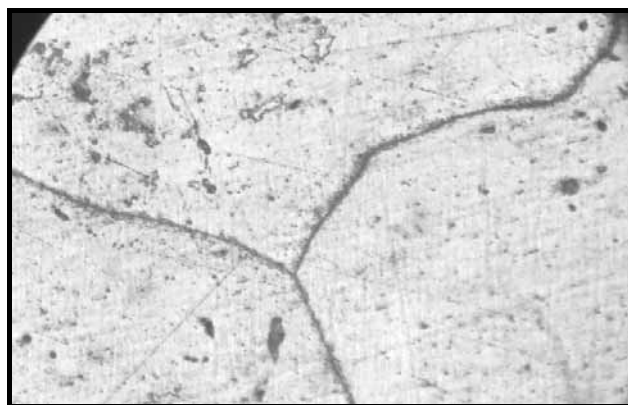


Рис. 2. Зона соединения зерен в структуре термитного металла
при $\times 400$

На рис. 3 представлены структуры зоны сварного соединения. Макрошлиф сварного соединения (рис. 3, а) показал четкую границу соединения термитного металла с материалом Ст3. Термитная сталь в зоне соединения представлена ферритной структурой, крупные зерна которой вытянуты и направлены в зону расположения Ст3 (т.е. в направлении теплового воздействия). При исследовании микрошлифа обнаружено глубокое диффузное проникновение зерна термитной стали в материал Ст3 (рис. 3, б). При этом структурная неоднородность одной фазы получена вследствие процесса рекристаллизации, который привел к образованию единого зерна (рис. 3, в). На границе сплавления со стороны Ст3 видна цепочка включений (рис. 3, г), что предположительно является остаточным аустенитом, который образовался вследствие высокой температуры реакции.

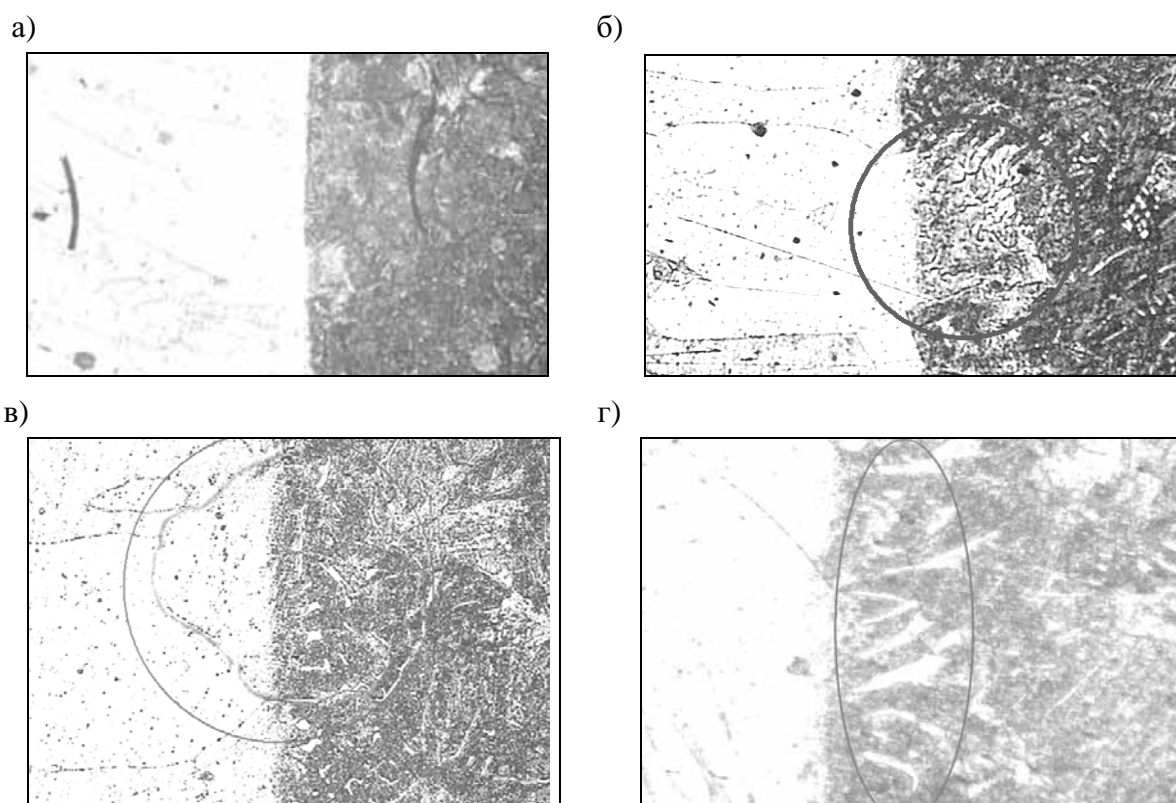


Рис. 3. Структура соединения термит – Ст3 при различном увеличении:
а – $\times 50$; б – $\times 100$; в – $\times 200$; г – $\times 400$

Таким образом, по результатам анализа структур можно утверждать, что термитная сталь является низкоуглеродистой с ярко выраженной ферритной структурой. Соединение термит – Ст3 является прочным сварным соединением, так как на границе термит – Ст3 происходит диффузное проникновение кристаллической структуры термита в Ст3, а единообразие свойств деталей и шва повышает надежность сварной конструкции за счет минимизации напряжений в структуре шва.

Исследованием микротвердости (рис. 4) определено, что HV для Ст3 составила 184, по шву в сторону Ст3 – 200, по шву – 205, по шву в сторону термита – 206, термит – 215.

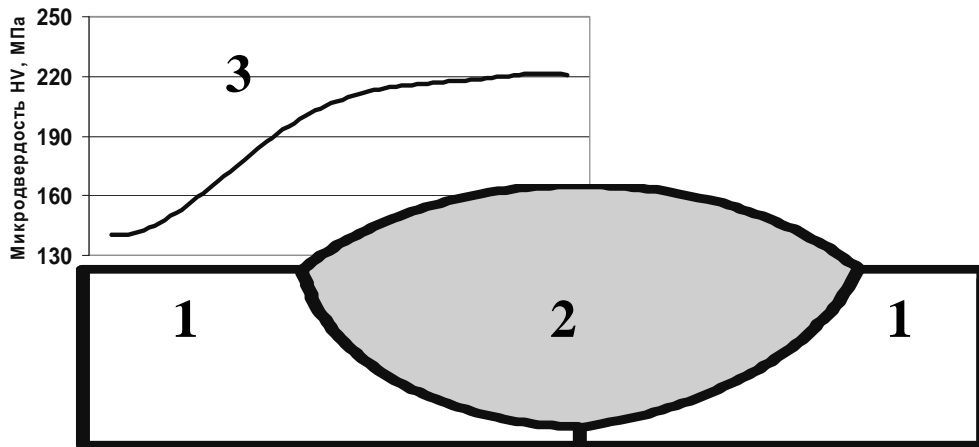


Рис. 4. Распределение микротвердости HV в половине сварного шва:
 1 – свариваемые детали; 2 – термитный металл;
 3 – кривая, характеризующая твердость HV

При определении удельного изменения массы образцов из термитной стали и электродной проволоки марки 09Г2С выявлены закономерности, представленные на рис. 5 и 6. На рис. 5 представлены зависимости удельного изменения массы образца от температуры, а на рис. 6 – зависимости изменения удельной массы образцов при 900 °С от времени выдержки. Анализ рис. 5 и 6 показал, что свойства термитного электродного металла значительно стабильнее эталонного как во времени, так и в зависимости от температуры.

Таким образом, установлено, что для получения сварных соединений металлоконструкций, работающих в условиях высоких температур и агрессивных сред, предпочтительнее применять термитную сталь в качестве электродного металла.

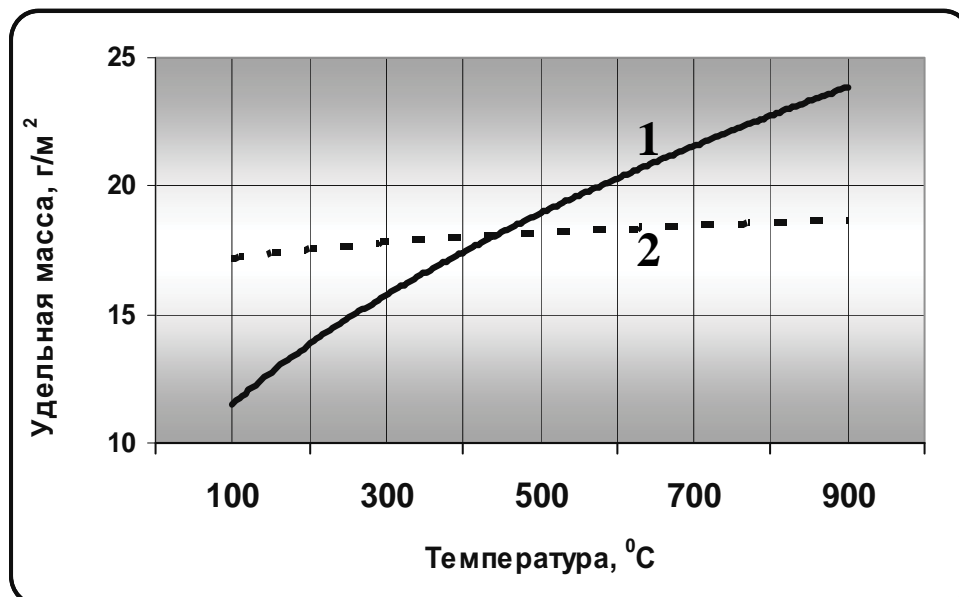


Рис. 5. Удельное изменение массы образца, г/м²:
 1 – образец электродного металла 09Г2С;
 2 – образец термитного электродного металла

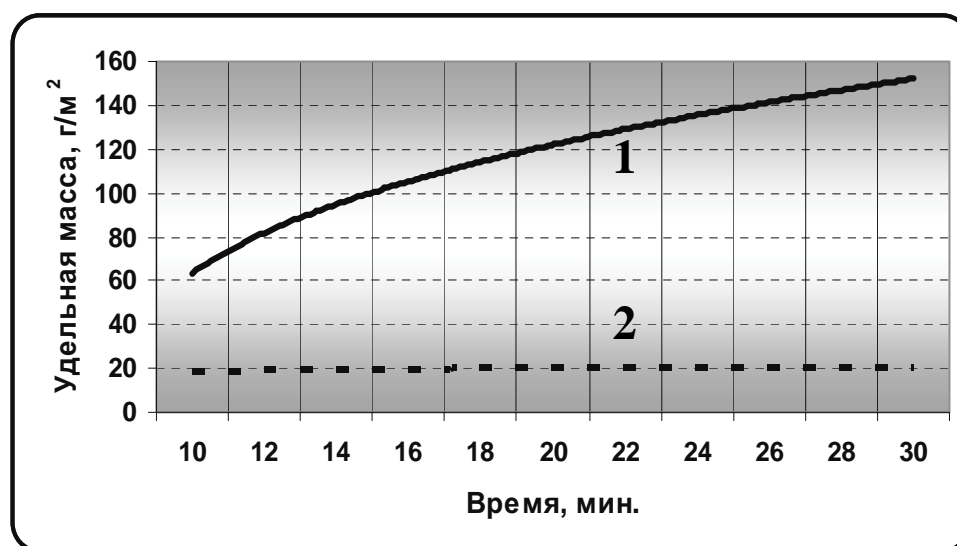


Рис. 6. Зависимость изменения удельной массы образцов при 900 °С от времени выдержки:

- 1 – образец электродного металла 09Г2С;
- 2 – образец термитного электродного металла

Соединение термит – деталь является прочным, так как в процессе термитной наплавки происходит диффузное проникновение кристаллической структуры термита в Ст3. Повышенная твердость термитной стали по сравнению с Ст3 позволяет считать её перспективной в аспекте использования в качестве наплавочного материала. Кроме того, применение алюмотермитного процесса позволит снизить энергоёмкость и значительно сократить себестоимость процесса сварки. При этом наплавленные поверхности по химическому и структурному составам аналогичны матричному металлу. Добавление легирующих компонентов в термитную шихту позволит получать сварные соединения, повышающие ресурс детали и работоспособность машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология и оборудование сварки плавлением и термической резки: учеб. для вузов. – 2-е изд., испр. и доп. / А. И. Акулов, В. П. Алехин, С. И. Ермаков [и др.] ; под ред. А. И. Акулова. – М.: Машиностроение, 2003. – 560 с.
2. Лившиц, Л. С. Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений / Л. С. Лившиц, А. Н. Хакимов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 336 с.
3. Исследование влияния фракции компонентов алюмотермитной смеси на технологические параметры получения термитных сталей / И. Г. Сапченко, С. Г. Жилин, О. Н. Комаров, В. В. Предеин, Е. Е. Абашкин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2011. – № 6. – С. 33-37.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
CONSTRUCTIONS AND ARCHITECTURE

Сысоев О. Е., Кузнецов Е. А., Куриный В. В., Шпорт Р. В.
O.E.Sysoyev, E.A.Kuznetsov, V.V.Kuriny, R.V.Shport

**СОВРЕМЕННЫЕ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ СТЕНДЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МАЛОЦИКЛОВЫХ НАГРУЗКАХ
В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ С УЧЕТОМ
ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

**STATE-OF-THE-ART TEST PANELS FOR STUDYING CONSTRUCTION MATERIALS
UNDER LOW-SYCLE LOADS AND IN COMBINED STRESS STATES, WITH REGARD
TO ACOUSTIC EMISSION PARAMETERS**

Сысоев Олег Евгеньевич – кандидат технических наук, профессор, декан факультета «Кадастр и строительство» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: [fks@knastu.ru](mailto: fks@knastu.ru).

Mr. Oleg E. Sysoyev – PhD in Engineering, Professor, Head of the Faculty of Cadastre and Civil Engineering, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: [fks@knastu.ru](mailto: fks@knastu.ru)

Кузнецов Егор Александрович – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. E-mail: [workegor@mail.ru](mailto: workegor@mail.ru).

Mr. Yegor A. Kuznetsov – PhD Candidate, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: [workegor@mail.ru](mailto: workegor@mail.ru)

Куриный Владислав Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и Технология Литейного Производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. E-mail: [kmtlp@knastu.ru](mailto: kmtlp@knastu.ru).

Mr. Vyacheslav V. Kuriny – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: [kmtlp@knastu.ru](mailto: kmtlp@knastu.ru)

Шпорт Роман Вячеславович – заместитель начальника департамента ЗАО «Гражданские самолёты Сухого» (Россия, Москва).

Mr. Roman V. Shport – Deputy Head of the Department of the Sukhoi Civil Aircraft Company, Moscow.

Аннотация. В статье описан испытательный стенд, способный задавать малоцикловое нагружение испытательного образца по любой траектории в пространстве напряжений, с возможностью одновременной регистрации параметров акустической эмиссии.

Summary. The paper describes a test bed capable of placing low-cycle loads on a test article along any trajectory in the stress space, with a possibility of simultaneously recording acoustic emission parameters.

Ключевые слова: испытательный стенд, малоцикловые нагружения, сложное напряженное состояние, параметры акустической эмиссии.

Key words: test stand, test bed, low-cycle loads, combined stress states, acoustic emission parameters.

УДК 539.3:534.2

При проектировании и эксплуатации машин и конструкций важно точное определение предельных состояний конструкционных материалов, что сводится к учету следующих факторов: значительное формоизменение деталей в результате пластической деформации, разрушение материала от превышения допустимых нагрузок, потеря устойчивости, износ деталей, коррозионное и температурное воздействия внешней среды, циклическая ползучесть,

усталость материала и т.п. Наиболее опасными факторами являются циклические нагрузки, от воздействия которых разрушение деталей происходит внезапно.

Большинство реальных деталей машин и конструкций подвержено действию сложного комплекса механических и тепловых воздействий, обуславливающих сложное напряжённое состояние материала (плоское или объёмное). В расчетах на прочность, в том числе в условиях действия сложной системы напряжений, в основном учитывают механические характеристики материалов, которые получены при простейших нагружениях (растяжении, сжатии, кручении). Современные исследования микромеханизмов пластической деформации и разрушения пока недостаточны для выполнения точных инженерных расчетов при воздействии циклических нагрузок. Поэтому возникает необходимость в проведении исследований и разработке критериев, учитывающих не только механические характеристики материалов при сложном напряженном состоянии, но и процессы, происходящие в структуре материала на микроуровне. Особенно важно учитывать динамику микропроцессов в текущем времени, что невозможно используемыми сегодня методами микроскопии и рентгеномиссии, но возможно при использовании метода акустической эмиссии (АЭ).

АЭ возникает в конструкционном материале, находящемся под механическим напряжением, от освобождения энергии в результате микро- и макроскопических явлений, вызванных локальной динамической перестройкой внутренней структуры материала [1-4].

Процессы пластического течения материала, процессы упрочнения и образования микронесплошностей успешно описываются с позиции теории дислокаций [5]. Наиболее распространенным, не вызывающим сомнений источником АЭ в металлах является быстрое движение групп дислокаций. Известны следующие источники АЭ, связанные с упругой и пластической деформациями: движение одиночной дислокации, парная аннигиляция, аннигиляция дислокаций на свободной поверхности, разрушение дислокационной петли, равномерное движение группы дислокаций, работа источника Франка-Рида, работа границ зерен в качестве источника дислокаций, распад-захват краевых диполей, образование линий скольжения, проскальзывание границ зерен, раскрепление или отрыв дислокаций.

Таким образом, любое изменение структуры материала при сложном напряженном состоянии, появление и залечивание дефектов сопровождается излучением АЭ. То есть по количеству и энергии сигналов АЭ можно определить стадию деградации структуры конструкционного материала.

В большинстве исследований для изучения механических свойств конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии широко используется метод испытания тонкостенных трубчатых образцов. Такие образцы под действием комбинированных нагрузок (осевая сила, крутящий момент и внутреннее давление) (см. рис. 1) обеспечивают плоское напряженное состояние и позволяют реализовать все возможные комбинации компонентов девиатора напряжений.

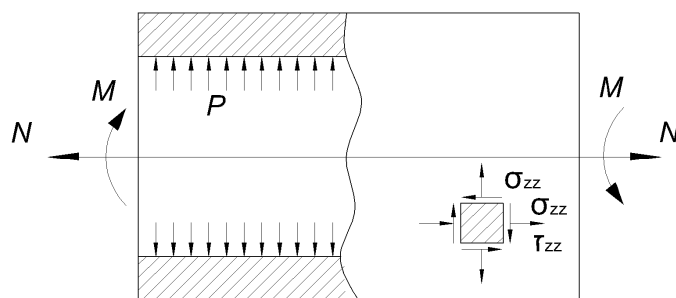


Рис. 1. Схема создания плоского напряженного состояния
При этом в рабочей части образца действуют следующие напряжения:

$$\sigma_z = \frac{R_B^2}{R_H^2 - R_B^2} \left(1 + \frac{N}{P} \cdot \frac{1}{\pi R_B^2} \right) P;$$

$$\sigma_\theta = \frac{R_B^2}{R_H^2 - R_B^2} \left(1 + \frac{R_H^2}{r} \right) P;$$

$$\sigma_r = \frac{R_B^2}{R_H^2 - R_B^2} \left(1 - \frac{R_H^2}{r} \right) P;$$

$$\tau_{\theta z} = \frac{2r}{\pi(R_H^4 - R_B^4)R_H^2 - R_B^2} M,$$

где R_H , R_B , r – соответственно наружный, внутренний и текущий радиусы.

Как видно из формул, напряжение σ_θ – окружное напряжение, σ_r – радиальное напряжение, $\tau_{\theta z}$ – касательное напряжение, возникающее от окружного и радиальных напряжений, зависят от текущего радиуса. Неоднородность напряженного состояния в стенке трубчатого образца уменьшается при увеличении отношения среднего радиуса $R_{cp} = (R_H + R_B)$ к толщине стенки δ

$$\sigma_r = -\frac{\delta_o}{R_{cp}} \sigma_\theta, \quad \Delta \tau_{\theta z} = -\frac{2\delta_o}{R_{cp}} (\tau_{\theta z})_{cp}.$$

Отношение $\frac{\delta_o}{R_{cp}}$ обычно колеблется в пределах от 0,08 до 0,04 [8]. Поэтому, учитывая,

что по мере развития пластических деформаций неоднородность напряженного состояния уменьшается, влиянием σ_r и $\Delta \tau_{\theta z}$, как правило, пренебрегают. При этом для обеспечения устойчивости рабочей части тонкостенного трубчатого образца приходится ограничивать размер базы измерений l_0 [8].

Для исследования поведения конструкционных материалов от воздействия циклических нагрузок, при сложном напряженном состоянии, с фиксацией параметров АЭ в Комсомольском-на-Амуре государственном техническом университете был создан испытательный стенд на базе стандартной испытательной машины МИ-40КУ (см. рис. 2) с использованием оригинального программного обеспечения [9].



Рис. 2. Фотография установки

Установка дает возможность проведения испытаний с использованием трубчатых образцов (см. рис. 3). Это позволяет задавать программу малоцикловых испытаний по любой траектории нагружения в пространстве напряжений (см. рис. 4) и любой форме цикла нагружения. Максимальные усилия, прикладываемые к образцам, не превышают 30 % от максимально возможных на МИ-40КУ, что позволяет соблюдать постоянную скорость нагружения и разгрузки при испытаниях.

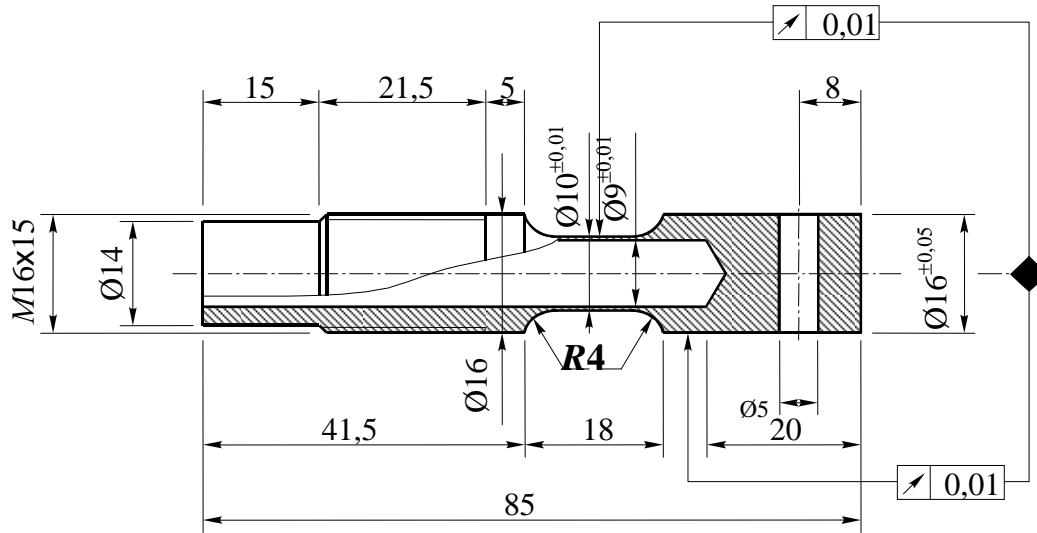


Рис. 3. Тонкостенный трубчатый образец

Запись сигналов акустической эмиссии производится с применением оригинального программного обеспечения [10] одновременно с непрерывной записью накопления величины циклической деформации.

Комплексная программа исследований долговечности материалов предусматривает проведение экспериментов при программном нагружении по различным траекториям механического малоциклового нагружения в условиях плоского напряженного состояния. Процесс нагружения в точке упругопластически деформируемого тела происходит в первой четверти плоскости двумерного вектора напряжений (см. рис. 4). Уравнение такой траектории нагружения имеет вид:

$$\vec{S} = S_1 \cdot \vec{i}_1 + S_3 \cdot \vec{i}_3 = S(t),$$

где S_1, S_3 – компоненты вектора напряжений.

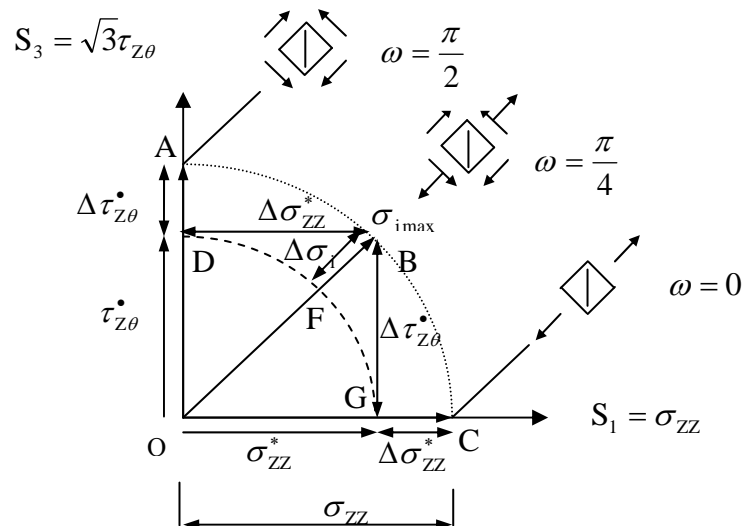


Рис. 4. Траектории циклического нагружения

Такое напряженное состояние, характеризуемое компонентами тензора напряжений $\sigma_{zz}(t) \neq 0$ и $\tau_{z\theta}(t) \neq 0$, создается в тонкостенном цилиндрическом образце, который подвергался растяжению и кручению ($N = N(t)$; $M_{KP} = M_{KP}(t)$).

Данная программа исследования позволяет создавать в материале плоское напряженное состояние при пропорциональном (по траектории $0 \rightarrow D \leftrightarrow A$, $0 \rightarrow F \leftrightarrow B$, $0 \rightarrow G \leftrightarrow C$ (см. рис. 4) и сложном (по траектории $0 \rightarrow G \leftrightarrow B$, $0 \rightarrow D \leftrightarrow V$ (см. рис. 1) циклическом нагружении ($\Delta\sigma_i = \sigma_{i\min} \leftrightarrow \sigma_{i\max}$). При этом вектор напряжений $S(t)$ в каждую единицу времени совпадает с вектором $\vec{\sigma}_i(t)$, конец которого описывает соответствующую траекторию нагружения в пространстве напряжений

$$\vec{\sigma}_i(t) = \sqrt{3}\tau_{z\theta}(t) \cdot \vec{i}_3 + \sigma_{zz}(t) \cdot \vec{i}_1 = S(t).$$

При этом установлено, что долговечность материала при данных ω^* и α зависит от формы и параметров циклов изменения интенсивности напряжений, а при данной программе циклического нагружения – от вида напряженного состояния ($\omega^* = \alpha$ (см. рис. 5) траектория $0 \rightarrow Q \leftrightarrow Z$) и сложности траекторий нагружения ($\omega^* \neq \alpha$ (см. рис. 5) траектория $0 \rightarrow Q \leftrightarrow H$). Здесь ω^* и α – соответственно углы, характеризующие направление вектора напряжений $\sigma_i(t)$ до и после его излома.

В работах [1; 11-13 и др.] также показано, что интенсивность накопления пластических деформаций, а также долговечность материалов при прочих равных условиях зависят от пути циклического нагружения. Поэтому проведение исследований при сложноподвижном состоянии, при воздействии циклических нагрузок имеет большое значения для практических расчетов конструкций.

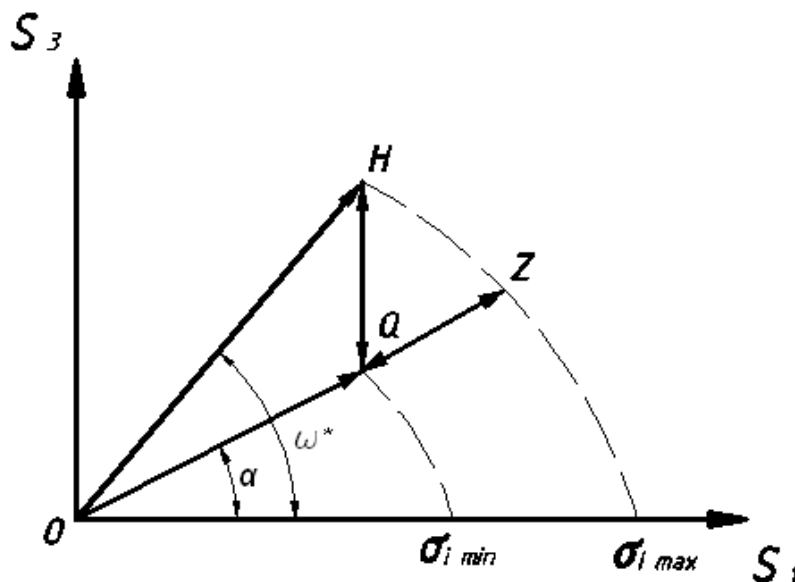


Рис. 5. Зависимость углов ω^* и α от направления вектора напряжений $\sigma_i(t)$ в пространстве напряжений

Создан экспериментальный стенд (см. рис. 6) для исследования поведения конструкционных материалов при различных видах сложного напряженного состояния по любым траекториям нагружения в пространстве напряжений (см. рис. 7). Одновременно с механиче-

Сысоев О.Е., Кузнецов Е.А., Куриный В.В., Шпорт Р.В. СОВРЕМЕННЫЕ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ СТЕНДЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МАЛОЦИКЛОВЫХ НАГРУЗКАХ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ С УЧЕТОМ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

ским программным нагружением материала фиксируется акустическая эмиссия, вызванная перестройкой структуры материала.

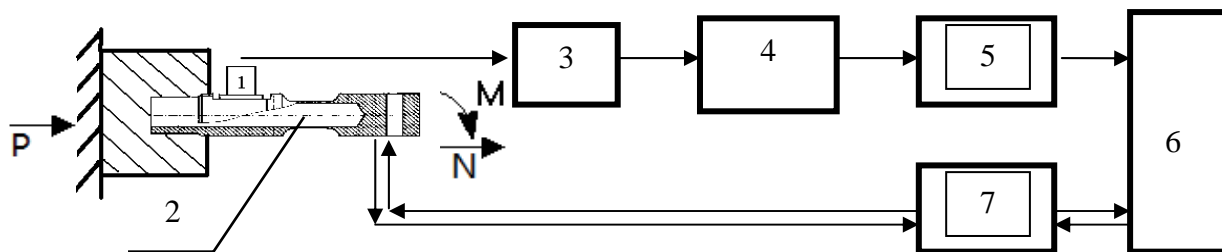


Рис. 6. Блок схема регистрации сигналов акустической эмиссии:

1 – пьезоэлектрический датчик; 2 – образец; 3 – предварительный усилитель акустических сигналов; 4 – аналоговоцифровой преобразователь; 5 – программное обеспечение для записи и обработки параметров акустической эмиссии [10]; 6 – системный блок ЭВМ; 7 – программное обеспечение для задания программы нагружения [9]

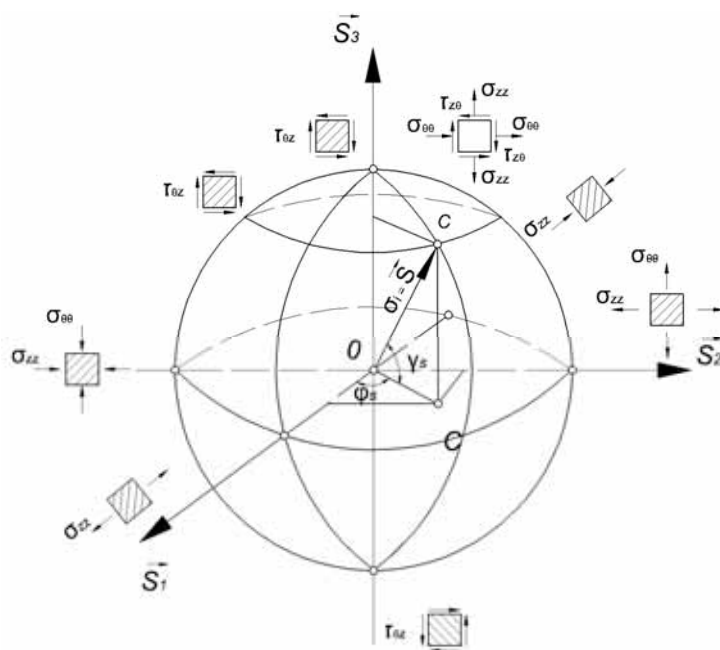


Рис. 7. Векторное пространство напряжений для плоского напряженного состояния.

Это позволяет в текущем времени отслеживать изменение структуры материала, то есть имеется возможность прогнозировать наступление предельных состояний конструкционного материала до проявления предельно допустимых деформаций.



ЛИТЕРАТУРА

1. Диагностика объектов транспорта методом акустической эмиссии / А. Н. Серьёзов [и др.] ; под ред. Л. Н. Степановой, В. В. Муравьева. – М.: Машиностроение / Машиностроение – Полет, 2004. – 368 с.
2. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении / Н. А. Семашко [и др.] ; под общей ред. д-ра техн. наук, проф. Н. А. Семашко. – М.: Машиностроение, 2002. – 240 с.
3. Сысоев, О. Е. Мониторинг изменения структуры материалов при циклических нагружениях по сигналам акустической эмиссии // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. – 2009. – № 1 (74). – С. 83-89.
4. Иванов, В. И. Классификация источников акустической эмиссии. Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций / В. И. Иванов, С. П. Быков. – 1985. – № 1. – С. 67-74.
5. Хирт, Д. Теория дислокаций / Д. Хирт, И. Лоте. – М.: Атомиздат, 1972. – 600 с.
6. Иванов, В. И. Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений / В. И. Иванов, В. М. Белов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
7. Иванов, В. И. Акустическая эмиссия в процессе когерентного разрушения / В. И. Иванов // Доклады АН СССР. – 1986. – № 2, т. 287. – С. 302-306.
8. Писаренко, Г. С. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии / Г. С. Писаренко, А. А. Лебедев. – Киев: Наукова думка, 1976. – 394 с.
9. Сысоев, О. Е. Жбанов С. А., Кузнецов Е. А. Программное обеспечение для управления испытательной машиной МИ-40КУ 2009 (ПО «ТМ-40 Manager 2009»). Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2010613498 2010 г.
10. Сысоев, О. Е., Жбанов С. А., Кузнецов Е. А. Программное обеспечение для регистрации сигналов акустической эмиссии «AERecoder 2009» (ПО «AERecoder 2009»). Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2010613499 2010 г.
11. Зубчанинов, В. Г. Экспериментальная пластичность : моногр. : в 2 кн. Кн. 2. Процессы сложного нагружения / В. Г. Зубчанинов, Н. Л. Охлопков, В. В. Гараников. – Тверь: ТГТУ, 2004. – 184 с.
12. Антипов, Е. А. Исследование влияния сложности траектории циклического нагружения на длительную прочность материалов / Е. А. Антипов, О. Е. Сысоев, С. В. Макаренко // Проблемы механики сплошной среды : материалы междунар. науч. конф ; Комсомольск-на-Амуре, 15-19 сент. 1997 г. : Комсомольск-на-Амуре : ГОУВПО «КНАГТУ», 1998. – 188 с.
13. Махутов, Н. А. Усталость металлов в широком диапазоне числа циклов / Н. А. Махутов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2004. – № 4, т. 70.

ХРОНИКА НАУЧНОЙ ЖИЗНИ CHRONICLE OF SCIENTIFIC LIFE

Одиноков В.И., Сапченко И.Г.
V.I.Odinokov, I.G.Sapchenko

20 ЛЕТ ОДНИМ КУРСОМ

20 YEARS ALONG THE SAME COURSE LINE

В целях обеспечения развития фундаментальных и прикладных исследований в области машиноведения и металлургии на Дальнем Востоке и во исполнение постановления ЦК КПСС и Совета Министров СССР № 1088 от 28 сентября 1987 г. постановлением Президиума Дальневосточного отделения АН СССР № 90-а от 12.07.88 г. на базе научных подразделений Института горного дела и Вычислительного центра ДВО АН СССР создан Институт машиноведения и металлургии ДВО АН СССР в г. Комсомольске-на-Амуре.

Директором-организатором Института машиноведения и металлургии с 15 июля 1988 г. был назначен доктор технических наук Верхотуров Анатолий Демьянович.

Созданный Институт состоял из четырех лабораторий (инструментальных материалов, поверхностного упрочнения металлических материалов, литейных композиционных и керамических материалов, нетрадиционных транспортных средств) и работал в основном в материаловедческом направлении, что не соответствовало целям организации института в регионе с развитым машиностроением и металлургическим производством.

Распоряжением председателя Дальневосточного отделения Российской академии наук № 16022-64УК от 20 марта 1992 г. директором Института машиноведения и металлургии ДВО РАН назначен доктор технических наук Одиноков Валерий Иванович, избранный на должность Общим собранием ДВО РАН 10 марта 1992 г. С этого момента началась новая веха в деятельности Института.

Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМиМ ДВО РАН) работает по основным фундаментальным направлениям, утвержденным Постановлением Президиума РАН:

- разработка теоретических основ и принципов создания машин и механизмов высокой производительности и надежности;
 - разработка новых процессов металлургического производства, технологий формоизменения и упрочнения материалов,
- полностью соответствующим предназначению Института.

В ИМиМ ДВО РАН работают 11 штатных научных сотрудников, в том числе пять докторов и шесть кандидатов наук. Действуют три лаборатории: новые технологии в металлургии, механики деформируемого твердого тела, математического моделирования технологических процессов. В Институте открыта аспирантура по трем специальностям и докторантура – по двум.

ИМиМ разрабатываются:

- технологии получения непрерывнолитых заготовок;
- технологии разрушения ледяного покрова;
- технологии литейного производства и металлургии с использованием минерального сырья и техногенных образований Дальневосточного региона; проводятся фундаментальные исследования в области деформированного разрушения материалов.

Наиболее значимыми разработками Института являются:

- технологический процесс получения непрерывнолитых деформированных заготовок;
- технологии разрушения ледяного покрова резонансным методом;
- технология получения слябовых заготовок на установке непрерывной разливки стали;
- технологии изготовления пористых моделей и оболочковых форм в литье по выплавляемым моделям;
- технологии переработки отходов металлургического производства с одновременным получением стального литья.



Разработкой совмещенных технологических процессов (СТП) производства арматурных, сортовых и фасонных профилей из цветных и черных сплавов на протяжении 20 лет занимается группа сотрудников ИМиМ ДВО РАН. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработаны новые высокоэффективные устройства: литейно-ковочные модули (ЛКМ) горизонтального (ЛКМГ) и вертикального (ЛКМВ) типов для получения металлоизделий из цветных и черных сплавов. Эти устройства реализуют идею полного совмещения процессов кристаллизации жидкого металла и его последующего деформирования в заданный профиль. Кроме этого в разработанную конструкцию установки ЛКМ может подаваться металлическая заготовка в подогретом до температуры горячего деформирования состоянии с целью последующего формоизменения. Скорость выхода заготовки составляет от 1 до 10 м/мин. Металл подвергается деформации до 80 %, что обеспечивает качественную внутреннюю структуру.

Технология использования кораблей на воздушной подушке для разрушения ледяного покрова резонансным методом осуществляется посредством возбуждения во льду резонансных изгибно-гравитационных волн. Получены графические зависимости, позволяющие определить максимальную толщину разрушаемого ледяного покрова в зависимости от основных параметров корабля на воздушной подушке и окружающей среды. Разработаны рекомендации по выбору скорости и режимам движения корабля, при которых эффективность разрушения ледяного покрова наибольшая. Преимущества данного нетрадиционного использования корабля на воздушной подушке заключаются в возможности проведения ледокольных работ без привлечения специализированных ледокольных судов, в возможности разрушения льда на любых глубинах акватории и эффективном разрушении заторов.

Разработан новый технологический процесс получения непрерывнолитых слябовых заготовок, заключающийся в изменении способа подвода жидкой стали в кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Получены результаты экспериментального исследования разлива стали через погружной разливочный стакан с эксцентричными выходными отверстиями, результаты металлографических исследований слябов и механических испытаний проката.

Выполнены экспериментальные исследования гидродинамики жидкой стали на модели кристаллизатора с использованием модели погружного разливочного стакана новой конструкции. Получены картины течения жидкости на модели, значения скоростей жидкостей.

С использованием уравнений Навье-Стокса и уравнения теплопроводности построена математическая модель, моделирующая гидродинамические потоки и температурное поле жидкого металла, поступающего из погружного стакана в кристаллизатор машины непрерывной разлива стали.

Способ опробован на слябовой машине МНЛЗ непрерывной разлива стали через напорный погружной стакан с эксцентричными выходными щелевыми отверстиями, обеспечивающими формирование плоских струй и направленных в сторону широких граней кристаллизатора под углом $\alpha = 5...7^\circ$. В результате разлива стали на основании металлографических исследований темплетов установлено существенное влияние конвективных потоков на структурообразование слябовых заготовок и увеличение механических свойств проката: ударной вязкости – на 5...30 %; σ_T , σ_B – до 3 %.

Использование экспериментального погружного разливочного стакана позволяет: сократить протяженность зон направленной кристаллизации с 96 до 42 мм по малому радиусу кривизны (r) (в 2,3 раза для стали Зсп) и с 96 до 15...54 мм (в 1,8...6,4 раза для стали 09Г2С); уменьшить глубину залегания трещин в среднем в 1,7...2 раза, что существенно уменьшает затраты времени на зачистку металла и съем металла.

При разливе стали 09Г2С со скоростью 0,55 м/мин и перегреве выше температуры ликвидус до 10 °С и стали Зсп со скоростью 0,5 м/мин и перегреве выше температуры ликвидус от 10 до 25 °С получены структуры кристаллизации с наименьшим баллом по «центральной пористости» и «осевой химической неоднородности».

Одним из направлений снижения брака, повышения качества и технологических свойств выплавляемых моделей (ВМ) и керамических оболочковых форм (КОФ) является

изменение их структурно-морфологического строения путем образования пористости определенных параметров и, как следствие, управление деформационными процессами.

Предложен новый подход в технологии изготовления ВМ холодным прессованием порошковых модельных материалов с пористой структурой требуемых параметров, направленный на реализацию управления их физико-механическими и деформационными свойствами и, как следствие, сокращение брака ВМ и КОФ повышения размерной и геометрической точности, чистоты поверхности отливок при снижении их себестоимости.

Исследовано влияние технологических режимов изготовления, соотношения исходных порошковых материалов и их фракционного состава на физико-механические, технологические и эксплуатационные свойства пористых ВМ.

Установлено влияние параметров пористости ВМ на деформационные процессы формируемых огнеупорных слоев керамической оболочки и, как следствие, на их физико-механические свойства.

Установлено влияние параметров пористости ВМ на деформационные процессы КОФ при выплавлении модельного состава.

Разработаны методы образования пористых структур КОФ требуемых параметров. Изучено влияние параметров пористости КОФ на деформационные процессы формирования огнеупорных слоев на пористых и плотных ВМ.

Установлено влияние параметров пористости ВМ на деформационные процессы как пористых, так и плотных КОФ при удалении модельного состава.

Исследовано влияние параметров пористости КОФ, таких как степень пористости, размер пор, вид пористости (рассредоточенная либо в виде цепочки пор), расположение пор в структуре на их реологические, физико-механические, теплофизические и технологические свойства.

Физическим моделированием процесса заливки КОФ с различными конструкциями литниково-питающих систем установлены предпочтительные параметры пористости их структур, противостоящие динамическому воздействию струи расплава.

Математическим моделированием выявлены особенности НДС КОФ в зависимости от параметров пористости при затвердевании расплава.

Разработан новый подход в технологии получения стальных отливок из термитных композиций, позволяющий устранить операцию традиционного получения жидкого металла, при этом отливки получают целиком из металла, образующегося в результате экзотермической реакции.

Установлено влияние температурных режимов подогрева термитных смесей и соотношение компонентов на газотворную способность, скорость процесса горения термитных смесей, жидкотекучесть и количество получаемого термитного металла.

Разработанные технологические процессы получения отливок из термитных смесей прошли опытные испытания и внедрение в ИМиМ ДВО РАН, показали свою работоспособность и используются в научно-производственном процессе для получения металлоизделий с определенным химическим составом и свойствами, необходимых для создаваемых машин и механизмов.

За время с 1992 г. сотрудниками Института и соискателями по разрабатываемым научным направлениям защищено 12 докторских и 18 кандидатских диссертаций.

За последние 10 лет научными сотрудниками опубликовано 40 монографий, учебников и учебных пособий, сборников научных трудов; свыше 140 статей в рецензируемых научных журналах; получено более 350 патентов РФ.

Сотрудники ИМиМ ДВО РАН удостоены званий: Заслуженный деятель науки РФ и Заслуженные изобретатели РФ, являются победителями конкурсов фундаментальных исследований РАН, ДВО РАН, награждены Почетными грамотами и дипломами различных степеней, Благодарностями Президиума РАН, удостоены золотых, серебряных и бронзовых медалей, специальных призов на российских и международных салонах и выставках интеллектуальных и промышленных разработок.



Мокрицкий Б. Я., Евстигнеев А. И.

M.Ya.Mokritskiy, A.I.Evstigneev

ОТЧЁТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ ОБ ИТОГАХ ПРОВЕДЕНИЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ КОНФЕРЕНЦИЙ

SCIENCE AND TECHNOLOGY CONFERENCES: SUMMARY

21-23 ноября на базе КнАГТУ состоялись совмещённые по срокам две научных конференции, а именно:

- Российская научно-техническая конференция «Фундаментальные исследования в области технологий двойного назначения»;

- Российская конференция «Школа-семинар по методологическому обеспечению и фундаментальным основам технологий двойного назначения».

Обе конференции посвящались 300-летию со дня рождения М.В. Ломоносова.

Первая из указанных конференций проводилась в формате заочного участия (доклады опубликованы). Основное внимание было сосредоточено на второй конференции в связи с тем, что она проводилась в формате мастер-классов и круглых столов. Этот формат конференции ещё во многом нов для нашего университета. Поэтому акцент был сделан не на массовость участников, а на обеспечение контакта студентов и молодых студентов с отдельными ведущими учёными КнАГТУ, региона и страны. Со стороны студентов и молодых учёных приглашались все желающие. В качестве ведущих учёных к проведению мастер-классов и круглых столов были приглашены: академик Панин В.Е. (Томск), член-корреспондент РАН Холькин А.И. (Москва), член-корреспондент РАН Буренин А.А. (Владивосток), доктора наук: Коробейников С.Н. (Новосибирск), Викулин А.В. (Петропавловск-Камчатский), Ковтанюк Л.В. (Владивосток), Ковалевич Е.В. (Москва), Гордиенко П.С. (Владивосток), Доставалов В.А. (Владивосток), Лейзерович Г.С. (Комсомольск-на-Амуре), Ри Хосен (Хабаровск), Заводинский В.Г. (Хабаровск), Верхотуров А.Д. (Хабаровск), Олейников А.И. (Комсомольск-на-Амуре), Тарануха Н.А. (Комсомольск-на-Амуре), Одинокоев В.И. (Комсомольск-на-Амуре), Козин В.М. (Комсомольск-на-Амуре). В работе конференций принимали участие главный редактор издательского дома «Металлургия и литейное производство» Яскевич И.А. (Москва) и начальник отдела Управления федеральной службы по техническому и экспортному контролю (ФСТЭК) по Дальневосточному федеральному округу Краснова Т.М.

Статистическая информация о конференциях следующая:

1. Доклады опубликованы в сборнике на 330 страницах (392 автора и соавторов докладов из городов Саратов, Ульяновск, Москва, Новосибирск, Иркутск, Томск, Благовещенск, Хабаровск, Комсомольск-на-Амуре, Владивосток, Находка, Петропавловск-Камчатский, Якутск. Из-за специфики конференций по ограничительным признакам отклонены доклады ряда авторов из Молдавии и Германии).

2. Всего в работе конференций приняло участие 276 человек, в том числе на пленарном заседании 143 человека. Качественный состав участников следующий: студентов – 148, аспирантов – 42, кандидатов наук – 16, докторов наук – 25, член-корреспондентов РАН – 2, инженеров и специалистов от промышленных предприятий и научных институтов города – 43.

К сожалению, в этом году не удалось получить финансирование от РФФИ. Организационно и финансово конференции получили поддержку со стороны Правительства Хабаровского края, Союза машиностроителей России, КнААПО, Администрации города Комсомольска-на-Амуре и других организаций.

В решении конференций участниками отражён положительный результат конференций. Он многогранен. Принципиально важным является то, что Дальневосточным отделением РАН озвучено предложение передать (с обеспечением финансирования) под опеку КнАГТУ проведение некоторых научных мероприятий, типичных только для структур РАН. Несомненно, это является признанием роли и значимости КнАГТУ, что способствует имиджу и статусу университета.

Самым важным итогом конференций явились возможность прямого контакта студентов и молодых учёных с ведущими учёными, обогащение знаниями и приобретение умений в ряде областей науки и техники. Число таких направлений в этом году было значительным, что не позволяло получить концентрированную информацию, но способствовало расширению научного кругозора слушателей. Накопленный опыт проведения мастер-классов и круглых столов будет использован в дальнейшей работе.

Евстигнеев А.И., Крысеев В.И.

МАСТЕР-КЛАСС ВЕДУЩИХ УЧЕНЫХ РОССИИ КАК ФОРМА СОХРАНЕНИЯ ПРЕЕМСТВЕННОСТИ ПОКОЛЕНИЙ В СФЕРЕ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Евстигнеев А. И., Крысеев В. И.

A.I.Evstigneev, V.I.Kriseev

МАСТЕР-КЛАСС ВЕДУЩИХ УЧЕНЫХ РОССИИ КАК ФОРМА СОХРАНЕНИЯ ПРЕЕМСТВЕННОСТИ ПОКОЛЕНИЙ В СФЕРЕ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

MASTER CLASSES GIVEN BY LEADING RUSSIAN RESEARCHERS AS ONE OF THE INSTRUMENTS ENSURING CONTINUITY OF SCIENTIFIC KNOWLEDGE FROM GENERATION TO GENERATION

Евстигнеев Алексей Иванович – доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: prorector-nr@knastu.ru.

Mr. Alexey I. Evstigneev – Doctor in Engineering, Professor, Provost for Research, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: prorector-nr@knastu.ru.

Крысеев Виталий Иванович – кандидат технических наук Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: nir@knastu.ru.

Mr. Vitaliy I. Kriseev – PhD in Engineering, Chief Engineer, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: nir@knastu.ru.

Аннотация. В статье рассматривается реализация мастер-классов ведущих ученых России, совмещенных с научными конференциями, как форм сохранения преемственности поколений в сфере науки и образования.

Summary. The paper considers organization of master classes given by leading Russian scientists and scientific conferences as one of the instruments ensuring continuity of scientific knowledge and university education between generations.

Ключевые слова: мастер-класс, ведущие ученые России, научные конференции, преемственность поколений.

Key words: Master class, leading Russian scientists, research conferences, continuity of generations.

Проблема преемственности поколений в условиях, сложившихся после «перестройки», перманентных реформ в области образования, инновационных преобразований, наиболее остро ощущается в сфере науки и образования.

Разрыв связей с научными школами бывших союзных республик, развал отраслевых НИИ, массовый отток научных специалистов за рубеж, переход вузов на «Болонскую» систему образования – все это вкупе разбалансировало механизм преемственности поколений.

Традиционная форма передачи знаний о последних достижениях ведущих ученых через конференции, симпозиумы и т.д. с последующей трансляцией в студенческой аудитории не обеспечивает живой связи между поколениями.

Входящие в оборот современные формы передачи ведущими учеными и специалистами своих знаний, опыта, методологии научного поиска посредством мастер-класса скорее связаны с учебно-воспитательным процессом.

Ведущий специалист-мастер во время мастер-класса рассказывает об актуальных проблемах, современных технологиях, авторской методологии, о своем отношении к данной проблеме и о психологическом и внутреннем настрое при поиске решений.

И здесь скорее проявляются личностные качества мастера, но скрыта та «закулисная» сторона, когда решаемая проблема обсуждается в дискуссиях, полемике, в научной среде с коллегами, когда новое и неизвестное становится достоянием научной и инженерной общественности.



Именно передача настроения, атмосферы, традиции жизни научной среды, унаследованная с диспутов М.В. Ломоносова, и была целью совмещения научной конференции с организацией проведения мастер-класса известными учеными России.

Такая связь между поколениями гарантирует непрерывность в истории становления научных школ Дальневосточного региона и, в частности, Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета.

Учитывая важность сохранения преемственности, а также с целью повышения профессионального уровня молодых ученых и обмена передовым опытом ведущих ученых России, было признано целесообразным провести в ноябре 2011 г. на базе КнАГТУ Российскую научно-техническую конференцию «Школа-семинар по методологическому обеспечению и фундаментальным основам технологий двойного назначения», посвященную трехсотлетию М.В. Ломоносова в формате «Мастер-класса».

Принятая модель и технология мастер-класса, совмещенная с работой конференции, позволяла, во-первых, создать условия непосредственного контакта Мастера с молодым поколением под «пристальным» наблюдением коллег, во-вторых, в профессиональных вопросах коллег и ответах Мастера в режиме дискуссии, полемики передать не только методологию, но и духовно-нравственный аспект в научной деятельности.

Первый, задавший тон всей конференции доклад профессора А.Д. Верхотурова от имени коллектива ведущих ученых Хабаровского края уже в своем названии «*Влияние наследия М.В. Ломоносова на становление и развитие науки и техники в России*» отражал озабоченность о необходимости сохранения преемственности и связи поколений в сфере научной деятельности.

Всего состоялось двенадцать мастер-классов, из них семь на секции «Материалов и технологий» и пять на секции «Механики». Особую значимость имели Мастер-классы старейшин отечественных ученых, которые формировали научный потенциал России XX века.

Мастер-класс д.т.н., профессора, Лауреата премии Совета Министров СССР, Заслуженного деятеля науки РФ А.Д. Верхотурова в области электроэрозионной, лазерной, электронно-лучевой и ультразвуковой технологии обработки тугоплавких металлов. От Мастера участники мастер-класса узнали историю начала и развития данных технологий, когда отрицательный результат одной работы послужил основой новых технологий при создании первых и последующих космических аппаратов.

Мастер-класс д.т.н., профессора, Члена-корреспондента РАН А.И. Холькина, который открыл существования нового класса экстракционных процессов, разработал промышленные способы извлечения и разделения цветных и редких металлов. Мастер поведал участникам конференции, как одно из решений бинарной экстракции пришло ему во сне. Несмотря на то что работы Мастера были исключительно важны для оборонной промышленности, сам стиль изложения материала, ответы на вопросы коллег поражали участников своей скромностью и тактом, что, несомненно, служило примером молодым ученым.

Мастер-класс д.ф.-м.н., профессора, директора Института материаловедения ХНЦ ДВО РАН В.Г. Заводинского «Компьютерное моделирование свойств наночастиц и наносистем методами квантовой механики». Один из самых дискуссионных мастер-классов, вызвавший массу вопросов со стороны коллег со стажем и молодых ученых. И еще один пример молодому поколению умения Мастера с большой буквы донести до аудитории знания XXI века.

Мастер-класс д.т.н., профессора Ри Хосена по проблемам литейного производства и использованию минерального сырья Дальневосточного региона с целью создания перспективных металлургических и литейных материалов. Мастер изложил свой путь по лабиринту науки от аспиранта и до автора научного открытия, подтвержденного дипломом № 349 от 05.02.2008 г. Это особенно ценно в воспитании у молодого поколения целеустремленности. Открытие Мастером явления изменения физических характеристик расплавов при воздействии на них наносекундных электромагнитных импульсов позволяет создавать новые наукоемкие технологии в области материаловедения.

Мастер-класс д.т.н. Е.В. Ковалевича по научным основам и технологии получения высокопрочного чугуна. Отличительная особенность данного мастер-класса для молодого поколения – это смелость на неординарный взгляд на обычные вещи, увидеть проблему и найти красивое решение. История чугуна насчитывает не одно тысячелетие. Но именно за создание и широкое промышленное внедрение принципиально нового класса конструкционных чугунов с высокими

Евстигнеев А.И., Крысеев В.И.

МАСТЕР-КЛАСС ВЕДУЩИХ УЧЕНЫХ РОССИИ КАК ФОРМА СОХРАНЕНИЯ ПРЕЕМСТВЕННОСТИ ПОКОЛЕНИЙ В СФЕРЕ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

параметрами специальных свойств Мастеру было присвоено звание «Лауреата премии Правительства РФ в области науки и техники».

Мастер-класс д.т.н., профессора В.А. Доставалова по управлению газодинамическими электромагнитными полями и термодинамической оценке образования титаносодержащих фаз на придуговом разряде на титановом катоде. Мастер продемонстрировал, и не только молодым, искусство презентации результатов научного поиска, рассчитанную на успех и признание строгих коллег.

Мастер-класс д.т.н., профессора, Лауреата премии Правительства РФ, Заслуженного деятеля науки РФ П.С. Гордиенко о моделях поведения металлов при локальном энергетическом воздействии, относящихся к наиболее наукоемким технологиям физико-химической обработки металлов.

Ясность и четкость построения и изложения существа научной проблемы и решение ее с привлечением современного научного аппарата действительным Мастером показали магистрантам, аспирантам, каким должен быть ученый XXI века.

Особо значимыми являлись проводимые известными учеными научных школ, «невидимых колледжей» в области фундаментальных основ современных технологий, выпускниками которых являются кандидаты и доктора наук.

Мастер-класс школы д.т.н., профессора, Заслуженного работника Высшей Школы РФ Н.А. Таранухи представлял д.ф.-м.н. Г.С. Лейзерович по неочевидным особенностям динамики тонких кольцевых структур с начальными неправильностями. Работа неоднозначная и имеет важное значение при проектировании морских судов, воздушно-транспортных средств и промышленных объектов.

В требовательной дискуссии, по поводу введения школой новых понятий в научный оборот, исходя из новых фактов, молодая аудитория имела возможность наблюдать формирование научного аппарата в режиме Онлайн.

Мастер-класс школы д.т.н., профессора В.И. Одинокова и д.т.н., профессора В.М. Козина представляли их ученики по резонансным эффектам в механике разрушения ледяного покрова. Особенность стиля данного «невидимого колледжа» – это сохранение преемственности поколений в научной и практической деятельности, умение Мастеров школы сплотить молодой научный коллектив на решение комплекса неординарных задач при прокладывании судоходных каналов среди сплошного неподвижного морского ледостава.

Мастер-класс школы члена-корреспондента РАН, д.ф.-м.н., профессора А.А. Буренина, д.ф.-м.н. Л.В. Ковтанюк по научным основам и практике применения больших упругопластических деформаций в качестве фундаментальной основы технологии обработки материалов давлением. Молодое поколение уже не в дискуссиях, а в процессе восприятия доклада Мастера о научных основах и последующего доклада другого Мастера о реализации научных результатах в промышленной технологии осознавали неразрывную связь науки и практики, и что наука не есть самоцель.

Мастер-класс школы д.ф.-м.н., профессора А.И. Олейникова и мастер-класс школы д.ф.-м.н., профессора С.Н. Коробейникова по теории и механике формообразования гиперупругих изотропных материалов. Один из наиболее ярких мастер-классов, когда Мастера разных школ из разных регионов России объединяются в содружество в решении сложнейших задач, особо значимых в современной авиакосмической промышленности, когда Великие Мастера, преступая «интересы рыночной конкуренции», посвящают свою жизнь поиску истины. Недаром ученики А.И. Олейникова пользуются авторитетом у многих зарубежных фирм. Это живой пример молодому поколению сохранения чистоты устремлений и служения обществу.

Практически все мастер-классы, проведенные в период работы конференции, были значимы и особо ценны с позиции сохранения преемственности и связи поколений в научно-исследовательской деятельности.

И здесь необходимо отметить мастер-класс ведущего спикера конференции Мастера д.т.н. Б.Я. Мокрицкого, который профессионально осуществлял связь между молодой аудиторией и научным коллективом.

Анализ эффективности конференции с позиции рефлексии на содержание докладов, вопросы, ответы, дискуссию и полемику участниками мастер-класса еще раз убеждает в справедливости выражения М.В. Ломоносова, что «может собственных Платонов и быстрых разумом Невтонов Российская земля рождать».