Учёные записки
Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета
№ III-1 (15)
2013

Кривенок А. А.
A. A. Krivenok

МОДЕЛИРОВАНИЕ В СИСТЕМЕ MSC.MARC ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ В РЕЖИМЕ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОГО СТАРЕНИЯ С УЧЕТОМ УСАДКИ МАТЕРИАЛА

MSC.MARC SYSTEM-BASED MODELING OF PART FORMING IN THE MODE OF THERMAL-STRAIN AGING WITH REGARD TO THE MATERIAL'S SHRINKAGE

Кривенок Антон Александрович – инженер-программист научно-производственного отдела филиала ОАО «Компания "Сухой" КнААЗ им. Ю.А. Гагарина» (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681018, ул. Советская, 1; +7(924)1155044.
Mr. Anton A. Krivenok – software engineer, Research and Production Department, Yuri Gagarin Aviation Plant, JSC "Sukhoi Company", (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 1, Soviet Str., Komsomolsk-on-Amur, 681018, mobile phone: + 7 (924) 1155044

Аннотация. В работе приведено описание особенностей технологического процесса формообразования деталей из алюминиевого сплава в режиме термодеформационного старения. Приведены физико-механические характеристики стареющего алюминиевого сплава В95оч, которые необходимы для проведения конечно-элементного моделирования. Рассмотрены этапы разработки конечно-элементной модели в системе MSC.Marc.

Summary. The paper describes certain features of the process of part forming from aluminum alloy in the mode of thermal-strain aging. The paper gives physical and mechanical properties of the B95o.ch. aluminum alloy that are necessary for finite element modeling. Considered are the stages of developing a finite-element model in the MSC.Marc system.

Ключевые слова: формообразование, стареющий алюминиевый сплав, термодеформационное старение, ползучесть, усадка, конечно-элементное моделирование.

Key-words: forming, aging aluminum alloy, heat strain aging, creep, shrinkage, finite-element modeling

УДК 629.73.002

Технологический процесс формообразования деталей из высокопрочного стареющего алюминиевого сплава В95 в режиме термодеформационного старения внедрен и успешно применяется на «КнААЗ им. А.Ю. Гагарина» при формообразовании крыльевых панелей самолета SSJ-100 на рециркуляционной нагревательной установке РНУ-13. Этот процесс обеспечивает минимизацию остаточных напряжений, наиболее равномерное их распределение в детали и сохраняет ресурс материала на уровне исходного состояния. Формообразование деталей в режиме термодеформационного старения характеризуется длительными низкими скоростями деформации при температурах искусственного старения, что позволило расширить диапазон температурно-силовых режимов нагружения, включая нестационарные режимы деформирования, и совместить процесс формообразования с процессом термообработки материала [1; 2; 3].

В результате проведенных ФГУП «ВИАМ» исследований уровня механических свойств и коррозионной стойкости при термодеформационном старении были разработаны технические условия на плиты из алюминиевого сплава В95очТФ, прошедшего первую ступень старения на металлургическом заводе–поставщике (ТУ 1-804-497-2011) и технологические рекомендации (ТР 1.2.2171-2011) для последующего формообразования (Ф) и старения по режиму второй ступени (Т2) на самолетостроительном заводе-потребителе при температуре 160±5 °С.

Материал поступил 24.06.2013

Кривенок А.А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ В СИСТЕМЕ MSC.MARC ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ В РЕЖИМЕ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОГО СТАРЕНИЯ С УЧЕТОМ УСАДКИ МАТЕРИАЛА

При разработке технологического процесса формообразования деталей в режимах термодеформационного старения необходимо проведение точного расчета каждого из технологических этапов. Для этого требуется исследовать всевозможные факторы, влияющие на процесс, и наиболее значимые учесть в расчетной модели. В связи со сложностью геометрией деталей, применяемых в авиационной промышленности, наиболее эффективным моделированием технологических процессов является конечно-элементное (КЭ) моделирование, позволяющее также учесть большой спектр различных факторов, влияющих на процесс.

В связи с тем, что в режимах термодеформационного старения скорости деформирования низкие и действуют на большом промежутке времени, необходимо применять модель ползучести материала. Для моделирования процесса формообразования в рассматриваемых режимах можно использовать несколько моделей, отличающихся по сложности точности. Например, для моделирования деталей относительно небольших размеров достаточно обойтись обычной моделью ползучести без учета температурных деформаций. Для неё полная деформация в материале будет иметь следующий вид:

$$\varepsilon_{total} = \varepsilon_{elastic} + \varepsilon_{creep},$$

где ε_{total} – полная деформация; $\varepsilon_{elastic} = \sigma/E$ – упругая деформация; $\varepsilon_{creep} = f(\sigma,t,T)$ – деформация ползучести.

Здесь упругие деформации и деформации ползучести определяются на основе текущего напряженного состояния. Функция ползучести зависит от напряжения, времени и температуры. Для определения параметров функции были проведены исследования при температуре старения T = 165 °C и были определены константы зависимости, описывающей степенной закон установившейся ползучести вида $\dot{\varepsilon} = B\sigma^n$. На рис. 1 в логарифмических координатах $\ln\sigma - \ln\dot{\varepsilon}_{\ln}(\eta = \dot{\varepsilon})$ точками представлены экспериментальные данные на растяжение, сплошная линия – аппроксимация зависимости скорости ползучести от напряжения.

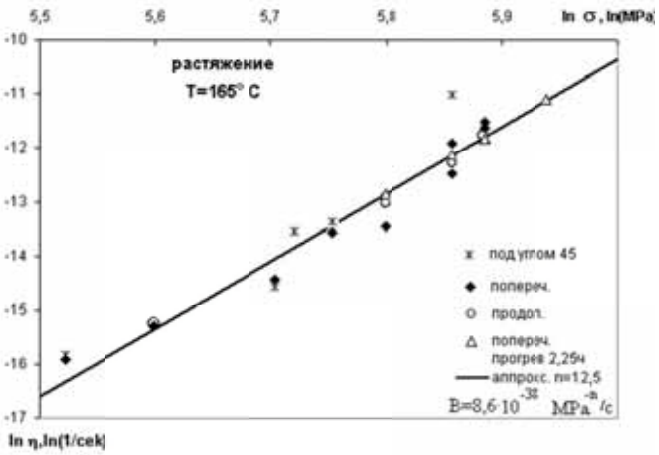


Рис. 1. Зависимость скорости деформаций ползучести от напряжения в логарифмических координатах

В случае если на каком-либо этапе деформирования детали напряжения будут близки или превышать предел текучести материала, тогда необходимо использовать ползучесть, сочетающуюся с упрочнением. Ползучесть, сочетающаяся с упрочнением, позволяет моделировать очень сложное поведение материала, при котором он может иметь начальное пластическое поведение с упрочнением материала и с течением времени может подвергаться неупругим деформациям ползучести. В такой постановке полная деформация в материале будет иметь следующий вид:

$$\varepsilon_{total} = \varepsilon_{elastic} + \varepsilon_{creep} + \varepsilon_{plastic},$$

где $\varepsilon_{plastic} = f(\sigma)$ – пластическая деформация, которая определяется независимо от других компонентов деформации и зависит от напряжения в материале. Эта функция задается либо

степенной зависимостью, либо линейно-кусочной аппроксимацией, заданной на основании экспериментальных данных. Важно, чтобы упругопластическая характеристика соответствовала тем скоростным режимам, при которых проходит процесс деформирования (см. рис. 2). Для сплава В95оч определены константы зависимости, описывающей упругопластическое деформирование ($\dot{\varepsilon}$ = 0,041 с$^{-1}$). $\varepsilon_{plastic} = K\sigma^m$, E = 67 ГПа, K = 1,05·10^{-77}(МПа$^{-m}$), m = 29 (см. табл. 1).

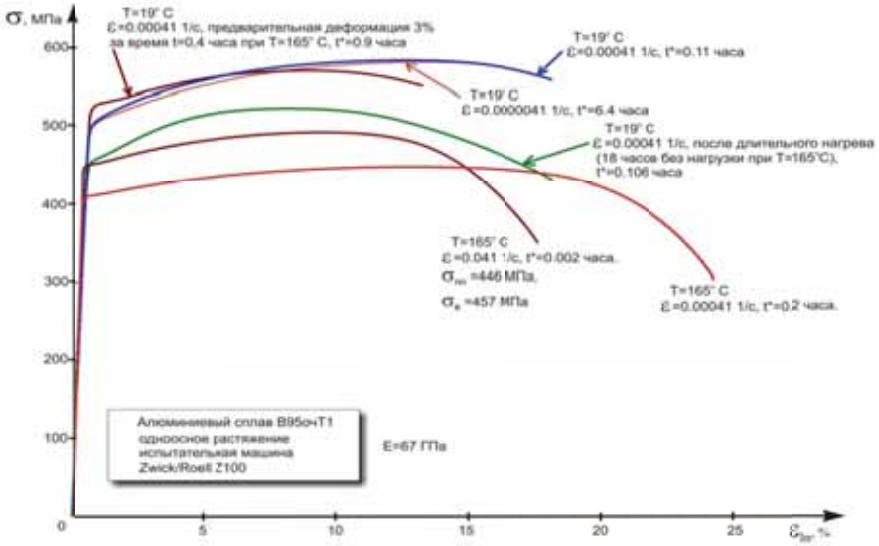


Рис. 2. Диаграмма «σ-ε» на растяжение при комнатной температуре и температуре 165 ºС с различными постоянными скоростями деформирования

Таблица 1

Физико-механические свойства сплава В95оч

Вид механических свойств		Ед. изм.	20 °С	125 °С	165 °С
Модуль Юнга	E	МПа	72000	68400	67000
Коэффициент Пуассона	μ		0,33	0,37	0,38
Предел текучести	σ_{02}	МПа	470	425	400
Предел прочности	$\sigma_в$	МПа	550	465	420
Удлинение	δ	%	12	13	18
Показатель ползучести	B	(МПа)$^{-n}$/с			$8{,}6 \cdot 10^{-38}$
Показатель напряжения в ползуч.	n				12,5

При разработке модели процессов формообразования крупногабаритных деталей в режиме термодеформационного старения важно учитывать то, что материал в процессе деформирования проходит процесс старения, сопровождающийся усадкой материала. То есть в процессе старения изменяется объем детали. При состаривании сплава В95очТ2Ф величина усадки невысокая, однако на крупногабаритных деталях, таких как крыльевая панель SSJ-100 (длина более 14 м), уменьшение длины может превышать 5 мм, что недопустимо. В связи с чем также необходимо проводить дилатометрические исследования материала при температурах старения (см. рис. 3). На основе полученных данных необходимо в заготовке закладывать дополнительные объемы в соответствующих направлениях проката плиты. Также необходимо учитывать усадку и в КЭ модели.

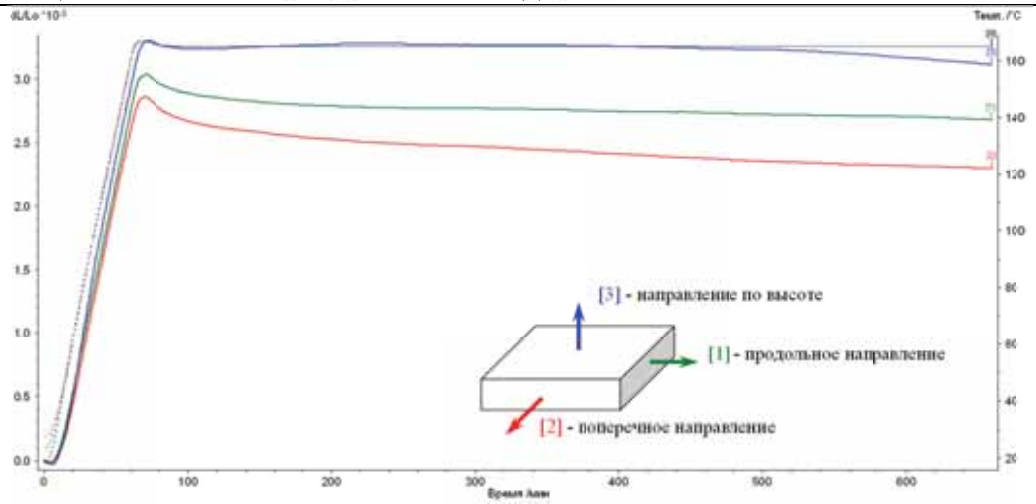


Рис. 3. Изменение длины заготовки в процессе старения

С учетом основных факторов, влияющих на материал: напряжение, время, температура, КЭ модель должна решаться в термостатической постановке. В этой постановке полная деформация в материале будет иметь следующий вид:

$$\varepsilon_{total} = \varepsilon_{elastic} + \varepsilon_{creep} + \varepsilon_{plastic} + \varepsilon_{term} + \varepsilon_{shrinkage},$$

где $\varepsilon_{term} = \alpha(T)$ – деформация температурного расширения, которая зависит от температуры; $\varepsilon_{shrinkage} = (1 + V_r^S)^{1/3} - 1$ – деформация усадки. В системе MSC.Marc усадочная деформация вычисляется согласно процессу объемного сжатия [5]. Степень усадки α_S определена как отношение объема усадки V_r^S к максимальному объемному усадки $V_r^{S\infty}$ состарившегося материала:

$$\alpha_S = V_r^S / V_r^{S\infty} = -3{,}07 \cdot 10^{-4}.$$

Рассматривая анизотропное поведение усадки, нужно указать соответствующие компоненты деформации. Закон изменения усадки будет зависеть от времени.

При решении технологических задач формообразования деталей из стареющих сплавов в режимах термодеформационного старения для настройки модели в КЭ пакете MSC.Marc необходимо выполнить следующие действия:

1. Импортировать из CAD системы электронную модель детали и других формообразующих контуров или задать их средствами MSC.Mentat/Patran. Затем сгенерировать КЭ сетку детали и задать теоретические контуры штамповой оснастки или пуансона. В среде MSC.Mentat все необходимые инструменты имеются в меню *Main/Mesh generation*.

2. В меню *Main/Contact/Contact bodies* задаются деформируемые и недеформируемые тела. В меню *Main/Contact/Contact tables* устанавливаются типы взаимодействия между телами.

3. В меню *Main/Initial conditions* устанавливаются начальные условия: начальная температура для всех узлов 20 ºС и степень усадки $\alpha_S = -3{,}07 \cdot 10^{-4}$.

4. В меню *Main/Boundary conditions* указать граничные условия: ограничения по перемещениям, нагрузку на пуансон или деталь, а также изменение температуры. Для упрощения модели можно принять, что градиент распределения температуры по всем элементам одинаковый и тогда изменение температуры будет в каждом узле одинаковым.

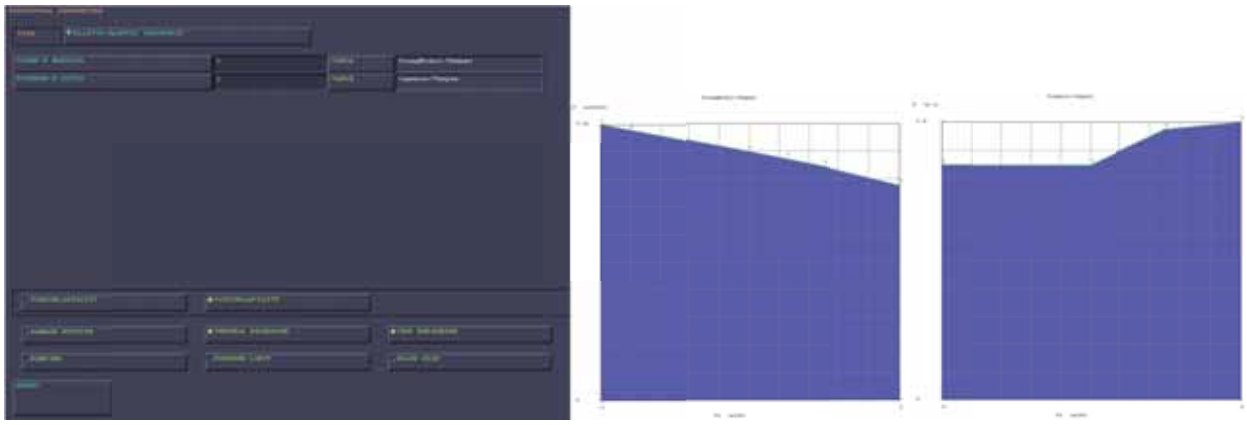
5. В меню *Main/Jobs* создать новый расчет типа *Thermal/Structural*. Затем указать, что расчеты производить для больших перемещений, для этого не выходя из текущего меню, выполнить последовательно: *Properties*; *Analysis options*; *Nonlinear procedure*: *Large strain*.

6. Задать характеристики материала меню *Main/Material properties*.

В случае если материал имеет значительную анизотропию, то в меню *Main/Material properties/Orientations* следует указать направление главных векторов.

В меню *Main/Material properties/ Material properties* создать новый материал типа *standard*, затем в *Analysis class* поменять его на *Thermal/Structural*. Далее задать все необходимые характеристики материала (см. рис. 4.)

а)



б)

в)

г)

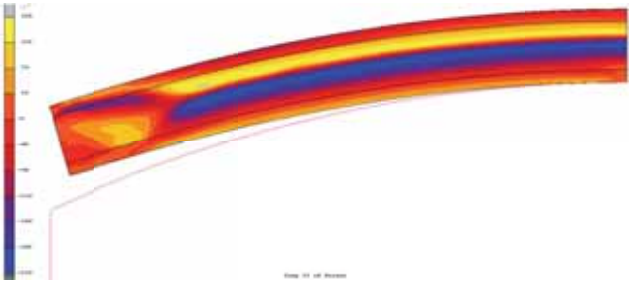
Рис. 4. Установка характеристик материала в системе MSC.Marc:
а – настройка упругих характеристик материала *Structural*;
б – настройка усадки материала *Structural/Cure shrinkage*;
в – настройка вязкоупругой модели, сочетающей и пластические,
и ползучие деформации *Structural/Viscoplasticity*;
г – установка коэффициента температурного расширения

7. После настройки материала необходимо настроить этапы решения задачи. В меню *Main/Loadcases* добавить новый этап с типом *Thermal/Structural: Transient/Creep*. Далее в *Main/Loadcases/Properties* установить длительность процесса. Расчетный шаг назначить адаптивным *Stepping procedure: Multi-Criteria*.

8. Перед запуском расчета произвести дополнение этапов расчета *Loadcases:Available* в меню *Main/Jobs/Properties*. Для дальнейшего анализа результатов в разделе *Main/Jobs/Properties/Job results* выбрать необходимые параметры контроля.

Настроив КЭ модель по предложенной схеме, можно получить достаточно точные результаты, которые охватывают все основные факторы, влияющие на процесс деформирования в условиях термодеформационного старения. Так, численное моделирование процесса формообразования заготовок в штампе при режиме термодеформационного старения показало обеспечение требуемых геометрических параметров заготовки, а также удовлетворительное напряженное состояние материала (см. рис. 5).

Тангенциальные напряжения -265…275 МПа



Тангенциальные остаточные напряжения -192…150 МПа

Эквивалентная деформация ползучести до 3.5 %

Рис. 5. Результаты расчета в системе MSC.Marc процесса формообразования заготовки сегмента шпангоута SSJ-100 в режиме термодеформационного старения

Проведенное исследование возможностей расчета нелинейного поведения материла в системе MSC.Marc позволило отработать метод разработки КЭ моделей, на которых были показаны возможности применения процессов формообразования в режиме термодеформационного старения для ряда каркасных деталей летательного аппарат из сплава В95очТ2Ф. По сравнению с существующими традиционными технологиями изготовления рассмотрен-

ных деталей предложенная технология обладает не только высокой эффективностью, но также позволяет сохранить эксплуатационные свойства материала детали на этапе ее изготовления.

В настоящее время технология формообразования в режиме термодеформационного старения получает свое дальнейшее развитие на «КнААЗ им. Ю.А. Гагарина». Положительный результат ее разработки и освоения приводит к возможности использования данной технологии для формообразования не только панелей плоскостной конфигурации, но и пояса бортовых нервюр, сегментов шпангоутов, а также оребренных и вафельных панелей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кривенок, А. А. Перспективная технология изготовления деталей силового набора летательного аппарата с использованием режима термодеформационного старения / А. А. Кривенок, Р. Ф. Крупский // Исследования и перспективные разработки в машиностроении: материалы второй научно-практической конференции молодых ученых и специалистов (Комсомольск-на-Амуре, 21 сент. 2012 г.) / под общ. ред. Р. А. Физулакова. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2012. – С. 197-199.
2. Кривенок, А.А. Исследование процесса формообразования алюминиевых стрингеров несимметричного сечения из прессованных профилей самолета SSJ-100 / А. А. Кривенок, С. В. Белых, А. В. Станкевич // Прикладные задачи механики деформируемого твердого тела и прогрессивные технологии в машиностроении: сб. ст. Вып. 3. Ч. 2. – Комсомольск-на-Амуре: ИМиМ (Институт машиноведения и металлургии) ДВО РАН, 2009. – С. 282-290.
3. Пат. 2475322 Российская Федерация, МПК51 B 21 D 11/20. Способ формообразования деталей / Кривенок А.А., Пекарш А.И., Сарыков С.Э., Крупский Р.Ф., Физулаков Р.А., Станкевич А.В., Олейников А.И., Бойко В.М.; заявитель и патентообладатель ОАО «КнААПО». − № 2011122064/02; заявл. 31.05.11; опубл. 20.02.12, Бюл. № 5 (II ч.). − 3 с.: ил.
4. Marc® 2010 User’s Guide, MSC.Software Corporation, 2010. – 1946 с.
5. Marc® 2010 Volume A: Theory and User Information, MSC.Software Corporation, 2010. – 832 с.
6. Marc® 2010 Volume E: Demonstration Problems, MSC.Software Corporation, 2010. – 3134 с.
7. Перевалов, А.А. Моделирование процесса изгиба в роликах несимметричных прессованных профилей в системе MSC.Marc // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2011. – № IV-1(8). – С. 71-77.