

Мокрицкий Б. Я., Саблин П. А., Григорьев В. В., Шелковников В. Ю.
B. Ya. Mokritskii, P. A. Sablin, V. V. Grigoryev, V. Yu. Shelkovnikov

**КЕРАМИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ НА ТВЁРДОСПЛАВНОМ ИНСТРУМЕНТЕ
ДЛЯ ТОЧЕНИЯ НЕРЖАВЕЮЩИХ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ СТАЛЕЙ**

**CERAMIC COATINGS ON A CARBIDE TOOL FOR TURNING STAINLESS
HARD-TO-WORK STEELS**

Мокрицкий Борис Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина 27. E-mail: bris@knastu.ru.

Boris Ya. Mokritskii – Doctor of Engineering, Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: bris@knastu.ru.

Саблин Павел Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ikpmt@knastu.ru.

Pavel A. Sablin – PhD in Engineering, Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: ikpmt@knastu.ru.

Григорьев Владимир Владимирович – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: grigorev.vlv@gmail.com.

Vladimir V. Grigoriev – Post-Graduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: grigorev.vlv@gmail.com.

Шелковников Вадим Юрьевич – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Vadim Yu. Shelkovnikov – Post-Graduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Аннотация. Судостроительная нержавеющая сталь марки 09Х17Н7Ю применяется в различных областях машиностроения. Существующие рекомендации по обработке судостроительных сталей устарели, необходима разработка новых рекомендаций. Проведены исследования по сокращению расходов на режущий инструмент за счёт применения новых покрытий. Установлена возможность применения такого инструмента для токарной обработки сменными типовыми твёрдосплавными пластинами. Выбраны рациональные покрытия из числа известных покрытий. Разработаны новые покрытия под заданные условия эксплуатации.

Summary. Shipbuilding stainless steel grade 09H17N7YU is used in various fields of mechanical engineering. The existing recommendations on the processing of shipbuilding steels are outdated, new recommendations need to be developed. Studies have been conducted to reduce the cost of cutting tools through the use of new coatings. The possibility of using such a tool for turning with replaceable standard carbide plates has been established. Rational coatings are selected from among the known coatings. New coatings have been developed for the specified operating conditions.

Ключевые слова: многослойные покрытия, токарные сменные пластины.

Key words: multilayer coatings, turning replaceable plates.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-29-00393, <https://rscf.ru/project/23-29-00393/>.

УДК 621.9

Введение. Востребованность в коррозионностойких материалах, способных работать в агрессивных и природных сложных условиях, растёт. Судостроение, химическая, нефтегазовая и пищевая отрасли применяют специализированные труднообрабатываемые нержавеющие стали. К таким сталям относится специализированная сталь марки 09X17H7Ю. На момент её разработки были соответствующие рекомендации по её обработке, сейчас они устарели. Возникла необходимость в разработке новых рекомендаций применительно к современным условиям, в том числе для высокопроизводительной обработки.

Имеющиеся публикации по обработке такой стали не систематизированы и не позволяют разработать рекомендации для современного уровня производства. Возникла необходимость в разработке рекомендаций по применению покрытий для металлорежущего инструмента с целью сокращения инструментальных затрат.

Ниже приведены отдельные результаты по разработке упрочняющих покрытий для твёрдосплавных сменных пластин применительно к токарным резцам для указанной стали. Результаты приведены применительно к продольному точению квадратными сменными пластинами (по ГОСТ 24248-80 их цифровое обозначение 03125, буквенное обозначение SNMG) с центральным отверстием. Режимы резания назначались следующие: глубина резания $t = 1$ мм; подача $s = 0,21$ мм/об; скорость резания $V = 50$ м/мин.

Обсуждение полученных результатов. Сталь марки 09X17H7Ю (ГОСТ 5632-2014 на материал и ГОСТ 7350-77 на сортамент проката) является труднообрабатываемой нержавеющей сталью. Значительное количество хрома (16...17,5 %) и никеля (7...8 %) затрудняет обработку резанием этой стали.

В качестве сравнения с этой сталью выполнены исследования для других труднообрабатываемых нержавеющих сталей марок 13X15H5 AM-3 и 12X18H10T.

Использован следующий подход к решению проблемы:

1. В качестве виртуального моделирования процесса резания использовались подходы имитационного моделирования. В качестве объекта моделирования рассматривался процесс токарной обработки труднообрабатываемых нержавеющих сталей 09X17H7Ю; 13X15H5 AM-3 и 12X18H10T. Основное внимание уделялось процессам, протекающим в зоне резания.

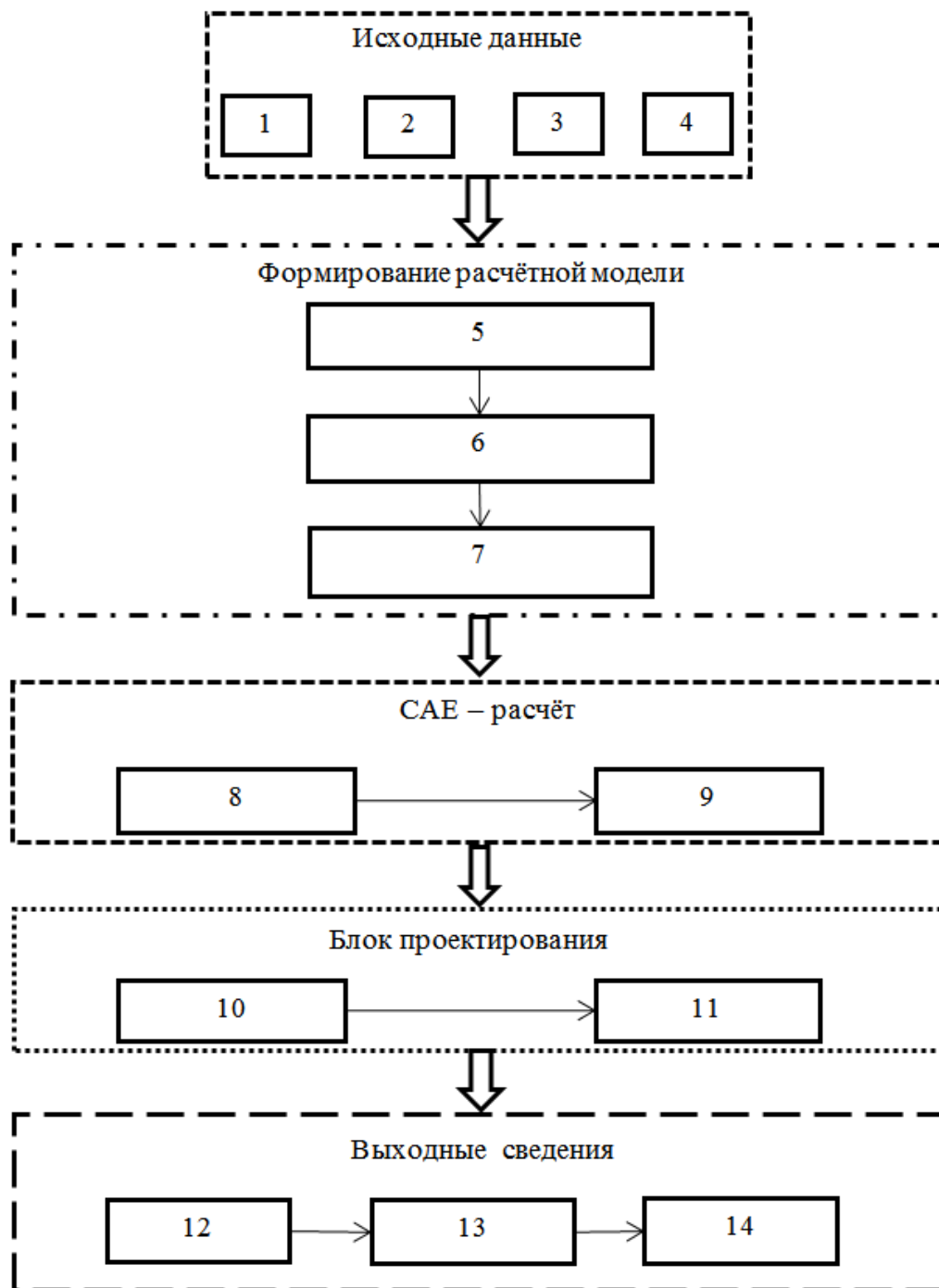
2. В ходе имитационного моделирования нами изучалось сложнапряжённое состояние режущего инструмента, при этом учитывалась сила резания.

3. Имитационное моделирование проводилось в программной среде Deform. В начале моделирования в качестве исходных данных для программы Deform использовались выходные параметры оценки сложнапряжённого состояния режущего инструмента. Данные параметры должны быть подтверждены экспериментальными данными. При этом результатом имитационного моделирования должны стать рекомендации по выбору режущего инструмента, режимов механической обработки и алгоритма проектирования нового покрытия на режущий инструмент для заданных условий эксплуатации.

Алгоритм виртуального моделирования приведён на рис. 1.

В ходе проведения эксперимента удалось установить влияние различного покрытия на режущем инструменте на силу резания. Для проведения натурных экспериментов использовался лабораторный динамометр со специализированным программным обеспечением (см. рис. 2). Данный лабораторный стенд регистрирует силу резания по её составляющим: P_x – продольная; P_y – радиальная; P_z – вертикальная.

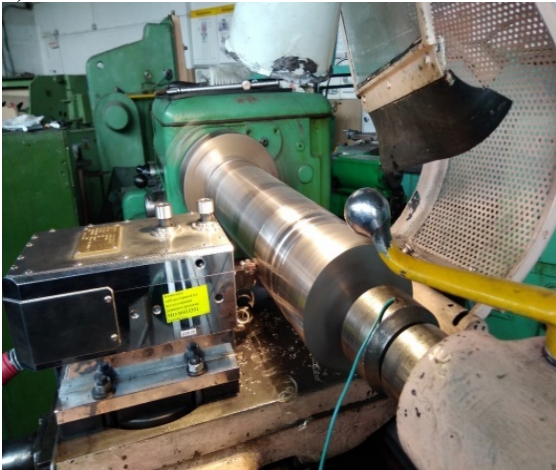
В ходе проведения эксперимента стало понятно, что значения составляющих сил резания при применении различных инструментальных материалов существенно отличаются [1]. Результаты экспериментальных данных для различных обрабатываемых материалов приведены в табл. 1.



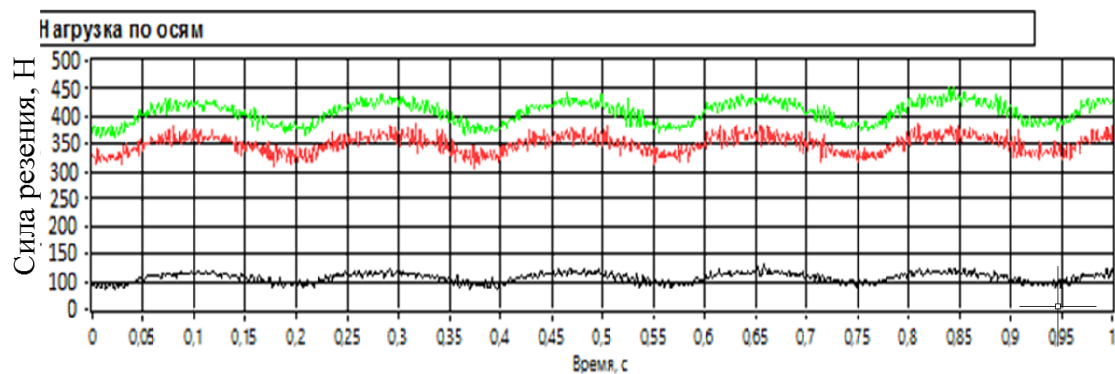
1 – характеристики оборудования; 2 – физико-технические характеристики обрабатываемого материала; 3 – физико-технические характеристики инструментального материала; 4 – выходные параметры процесса резания; 5 – моделирование твёрдых объектов обработки; 6 – конечно-элементное моделирование обрабатываемой заготовки и режущего инструмента; 7 – задание экстремумов и выходных параметров моделирования; 8 – расчёт выходных параметров процесса обработки; 9 – обработка входных параметров; 10 – разработка рекомендаций по созданию состава и архитектуры упрочняющего покрытия и рекомендаций по подбору режимов резания; 11 – разработка нового покрытия для режущего инструмента; 12 – построение диаграмм по результатам моделирования; 13 – сохранение результатов; 14 – формирование базы данных

Рис. 1. Алгоритм реализации виртуальной модели

а)



б)



в)

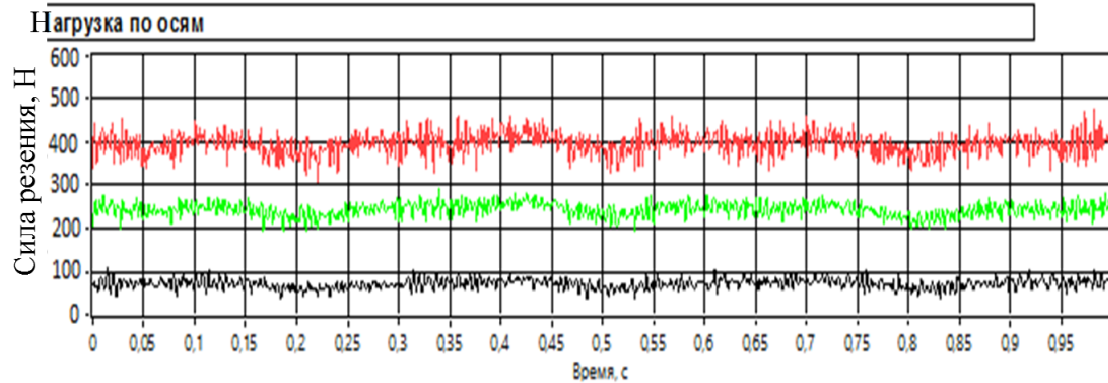


Рис. 2. Лабораторный стенд по исследованию сил резания при точении, основанный на динамометре STD201-2 (а); графики составляющих сил резания при обработке инструментальным материалом $VK8+TiN(2\text{ мкм})+TiC(5\text{ мкм})$, где верхняя линия – P_y , средняя – P_z , нижняя – P_x (б); графики составляющих сил резания при обработке инструментальным материалом $VK8+TiCN(0,5\text{ мкм})+TiN(1\text{ мкм})$, где верхняя линия – P_z , средняя линия – P_y , нижняя – P_x (в)

Из табл. 1 видно, что в зависимости от материала заготовки силы резания настолько разные, что позволяют нам идентифицировать режущий инструмент (с покрытием или без).

В ходе виртуального моделирования было спроектировано более 30 новых покрытий, которые повышают период стойкости режущего инструмента в несколько раз [2; 3]. В данных работах мы показываем, что наиболее эффективными при экспериментальной проверке оказались инструментальные материалы, указанные в табл. 2.

Таблица 1

Усреднённые результаты экспериментальных исследований

Составляющие силы резания	Материал заготовки		
	12X18H10T	09X17H7Ю	13X15H AM-3
F_x , Н	66,7	87,5	33,2
F_y , Н	310,0	303,2	312,1
F_z , Н	282,6	362,0	193,4

Таблица 2

Прирост периода стойкости режущего инструмента с разработанными износостойкими покрытиями при обработке нержавеющей стали 09X17H7Ю

Упрочняющее керамическое покрытие на инструментальном материале ВК8	Изменение периода стойкости	
	кратно (в разы)	в минутах
Режимы резания: $t = 1$ мм; $V = 50$ м/мин; $s = 0,021$ мм/об		
TiCN → (TiAl)N → Al ₂ O ₃ → TiC	3,09	139
Al ₂ O ₃ → (Ti)CN → (TiAl)N → TiN	2,89	129
(TiAl)N → Al ₂ O ₃ → (TiAl)N → Al ₂ O ₃	2,79	124
TiCN → (TiAl)N → Al ₂ O ₃ → TiC	2,59	123

В ходе проведения экспериментов установлено, что шероховатость обработанной поверхности существенно зависит от состава и архитектуры упрочняющего покрытия. Экспериментальные данные, полученные при точении нержавеющей стали 09X17H7Ю, приведены в табл. 3.

Таблица 3

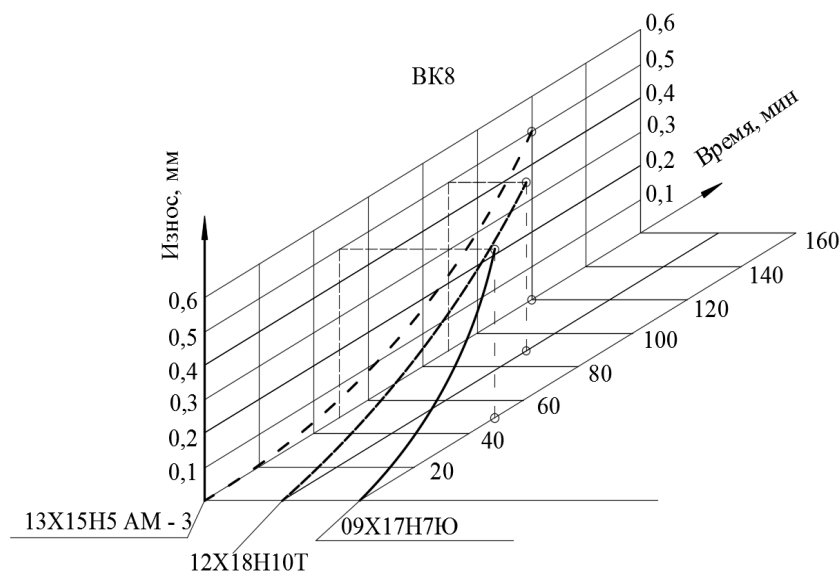
Сравнение результатов шероховатости поверхности при обработке заготовки 09X17H7Ю инструментом ВК8 без покрытия и с нанесённым керамическим покрытием

Упрочняющее керамическое покрытие на инструментальном материале ВК8	Параметр шероховатости	Значения соотношения В1/В2* параметров
TiCN → (TiAl)N → Al ₂ O ₃ → TiC	Ra	1,51
	Rz	1,30
Al ₂ O ₃ → (Ti)CN → (TiAl)N → TiN	Ra	1,31
	Rz	1,19
(TiAl)N → Al ₂ O ₃ → (TiAl)N → Al ₂ O ₃	Ra	1,20
	Rz	1,09
TiN → TiC → TiN → TiC	Ra	1,20
	Rz	1,10
TiC → TiN → (TiAl)N	Ra	1,09
	Rz	1,05
TiCN → TiC → TiN	Ra	1,20
	Rz	1,10
TiC → TiN	Ra	1,09
	Rz	1,07
TiN → TiC	Ra	1,08
	Rz	1,06
TiCN → TiN	Ra	1,07
	Rz	1,02

Кроме распространённых параметров шероховатости Ra и Rz, нами также были исследованы четыре дополнительных параметра R3z, Rp, Rq, Rt, которые характеризуют особые свойства шероховатости обработанной поверхности. Из табл. 3 видно, что все разработанные упрочняющие керамические покрытия на режущий инструмент приводят к повышению качества обработанной поверхности ($B1/B2 > 1$). В частном случае данный коэффициент достигает 1,51, т. е. высота микронеровностей (шероховатость поверхности) снизилась на 51 %. Данные табл. 3 позволяют подобрать режущий инструмент с упрочняющим покрытием, который обеспечит заданные требования шероховатости поверхности даже для труднообрабатываемой стали 09X17H7Ю. Для сталей 12X18H10T и 13X15H5 AM-3 соотношение $B1/B2$ имеет значительно большие значения. Для данных сталей наиболее рациональными по составу и архитектуре являются следующие режущие инструменты: $VK8+TiCN \rightarrow (TiAl)N \rightarrow Al_2O_3 \rightarrow TiC$ и $VK8+Al_2O_3 \rightarrow (Ti)CN \rightarrow (TiAl)N \rightarrow TiN$.

На рис. 3 показано, что при применении упрочняющих керамических покрытий стойкость режущего инструмента возрастает со 120 до 150 мин (при обработке стали 13X15H5 AM-3) и с 90 до 140 мин (при обработке стали 12X18H10T) в сравнении с применением инструмента VK8 без покрытия. Здесь применялось покрытие $Ti \rightarrow TiN \rightarrow (TiAl)N$.

а)



б)

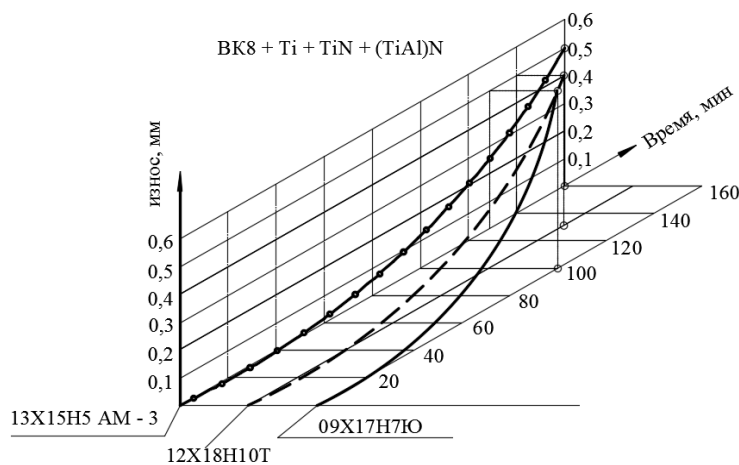


Рис. 3. Периоды стойкости режущего инструмента (VK8) без упрочняющего покрытия (а) и с нанесённым керамическим покрытием при точении различных труднообрабатываемых сталей (величина износа 0,5 мм) (б)

Применение режущего инструмента ВК8 со следующей архитектурой и составом покрытия $\text{TiCN} \rightarrow (\text{TiAl})\text{N} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{TiC}$ при обработке стали 13X15H5 АМ-3 позволяет повысить период стойкости с 90 до 185 мин. Для стали 13X15H5 АМ-3 применение инструмента с данным покрытием является наиболее рациональным.

В целом, полученные результаты не противоречат результатам других исследователей [4–9].

На рис. 4 показан уровень совпадения прогнозируемых и экспериментальных данных по параметрам (температура, напряжения, деформация, износ). Этот рисунок характеризует закономерность изменения выходных параметров процесса токарной обработки стали 09X17H7Ю (режимы резания: $V = 50$ м/мин, $t = 1$ мм, $S_{об} = 0,21$ мм/об) разными инструментами.

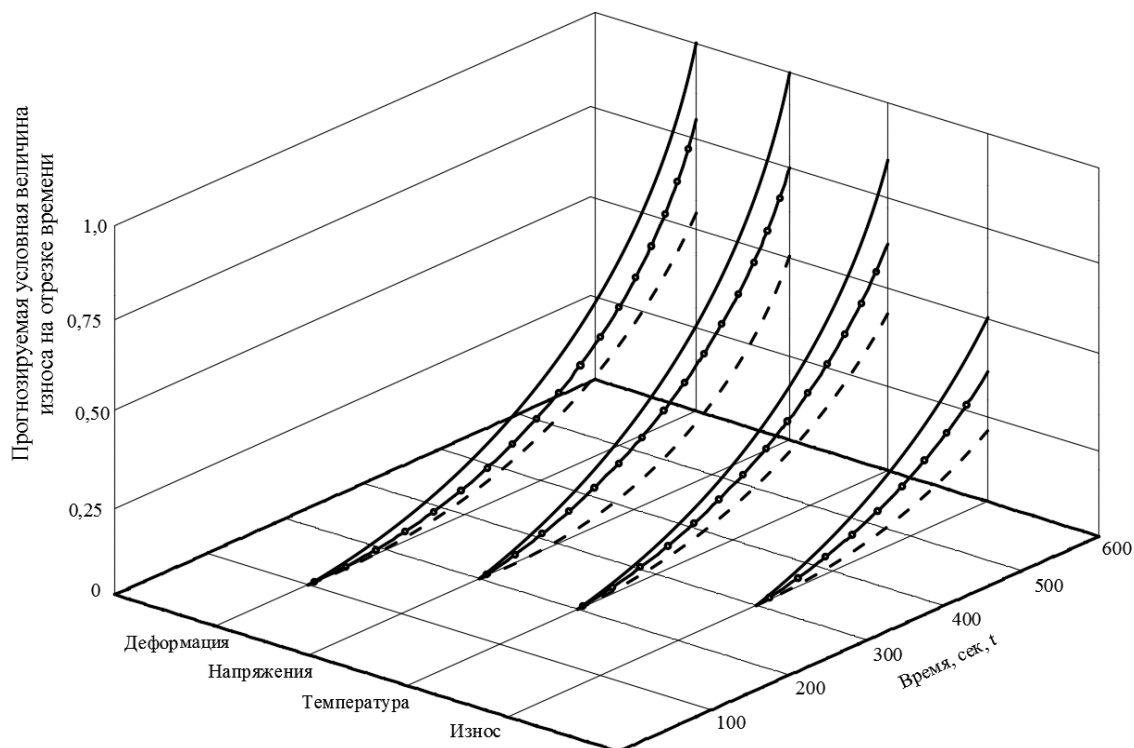


Рис. 4. Результаты имитационного моделирования выходных параметров процесса резания при использовании: сплошная линия – инструмент ВК8 без покрытия; сплошная с точками – инструмент ВК8 с покрытием $\text{TiCN} \rightarrow \text{TiN}$; штриховая линия – инструмент ВК8 с покрытием $\text{TiC} \rightarrow \text{TiN} \rightarrow (\text{TiAl})\text{N}$

Вертикальная ось (условный износ) ограничивается единицей (см. рис. 4). Из графика следует, что наилучший вариант покрытия (из рассмотренных) на инструментальный материал ВК8, обеспечивающий максимальную стойкость, является $\text{TiC} \rightarrow \text{TiN} \rightarrow (\text{TiAl})\text{N}$. Причём время его стойкости увеличивается более чем в 2 раза в сравнении с инструментом без покрытия и в 1,4 раза в сравнении с покрытием $\text{TiCN} \rightarrow \text{TiN}$. Тенденции в изменении других параметров аналогичны изменению параметра «износ».

Имитационное моделирование прошло более чем 30 вариантов упрочняющих керамических покрытий для режущего инструмента. Далее приведены режущие инструменты ВК8 с разработанными упрочняющими покрытиями, расположенные в порядке убывания периода стойкости при обработке труднообрабатываемых нержавеющей сталей:

1. $\text{TiCN} \rightarrow (\text{TiAl})\text{N} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{TiC}$;
2. $\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow (\text{Ti})\text{CN} \rightarrow (\text{TiAl})\text{N} \rightarrow \text{TiN}$;
3. $(\text{TiAl})\text{N} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow (\text{TiAl})\text{N} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3$;
4. $\text{TiN} \rightarrow \text{TiC} \rightarrow \text{TiN} \rightarrow \text{TiC}$;

5. $TiC \rightarrow TiN \rightarrow (TiAl)N$;

6. $TiCN \rightarrow TiC \rightarrow TiN$;

7. $TiC \rightarrow TiN$;

8. $TiN \rightarrow TiC$;

9. $TiCN \rightarrow TiN$;

10. Инструмент без покрытия.

Заключение. По совокупности полученных результатов сделаны следующие прогнозные выводы:

1. В результате имитационного моделирования предложенные упрочняющие керамические покрытия позволяют повысить период стойкости режущего инструмента с 45 мин (BK8 без покрытия) до 140...180 мин.

2. При обработке стали 09X17H7Ю инструментом BK8 без покрытия период стойкости режущего инструмента будет минимален. При точении стали 13X15H5 АМ-3 – максимален.

3. Качество обработанной поверхности при оценке параметров её шероховатости тоже существенно зависит от применяемого покрытия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Управление шероховатостью поверхности при обработке заготовок из труднообрабатываемых и упрочнённых материалов / П. А. Саблин, В. С. Щетинин, Б. Я. Мокрицкий, М. С. Юрченко // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2023. – Т. 19. – № 2 (218). – С. 59-63.

2. Мокрицкий, Б. Я. Применение покрытий для создания инструментальных материалов: моногр. / Б. Я. Мокрицкий, Е. В. Безолукова, Э. С. Ситамов. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2019. – 118 с.

3. Мокрицкий, Б. Я. Повышение работоспособности твёрдосплавного режущего инструмента за счёт нанесения покрытий / Б. Я. Мокрицкий, Э. С. Ситамов, А. Г. Серебренникова // Вестник ИрГТУ. – 2019. – Т. 23. – № 2. – С. 246-251.

4. Alexey Vereschaka, Boris Mokritskii, Elena Mokritskaya, Oleg Sharipov and Maksim Oganyan. Two-component end mills with multilayer composite nano-structured coatings as a viable alternative to monolithic carbide end mills // Mechanics & Industry 18, 705 (2017), © AFM, EDP Sciences 2017, <https://doi.org/10.1051/meca/2017052>.

5. A. A. Vereschaka, M. A. Volosova, S. N. Grigoriev, A. S. Vereschaka, Development of wear-resistant complex for high-speed steel tool when using process of combined cathodic vacuum arc deposition, Procedia CIRP 9 (2013) p.p. 8–12, doi:10.1016/j.procir.2013.06.159.

6. A. Vereschaka, M. A. Volosova, A. D. Batako, A. S. Vereshchaka, B. Y. Mokritskii, Development of wear-resistant coatings compounds for high-speed steel tool using a combined cathodic vacuum arc deposition, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 84 (2016) p. 1471-1482, doi:10.1007/s00170-015-7808-5.

7. A. O. Volkhonskii, A. A. Vereshchaka, I. V. Blinkov, A. S. Vereshchaka, A. D. Batako, Filtered cathodic vacuum arc deposition of nano-layered composite coatings for machining hard-to-cut materials, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 84 (2016) p. 1647–1660, doi:10.1007/s00170-015-7821-8.

8. Григорьев, С. Н. Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента: моногр. / С. Н. Григорьев, В. П. Табаков, М. А. Волосова. – Старый Оскол: ТНТ, 2011. – 380 с.

9. Отряскина, Т. А. Исследование термодинамических процессов при стружкообразовании / Т. А. Отряскина, Е. Г. Кравченко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № VII-1 (47). – С. 85-89.