

УДК 621.91.01

Качественные изменения поверхностного слоя металлорежущего инструмента с износостойким покрытием путем применения экологичных смазывающих технологических сред^{*}

В.В. Скакун^{1,2}, Р.М. Джемалидинов^{1,2}, А.И. Алиев^{1,2}, Ю.А. Егоров²

¹ ГБОУ ВО Республики Крым «Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова»

² Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского

Qualitative changes in the surface layer of metal cutting tools with wear-resistant coating by using environmentally friendly lubricating technological environments

V.V. Skakun^{1,2}, R.M. Dzhemalyadinov^{1,2}, A.I. Aliyev^{1,2}, Yu.A. Egorov²

¹ Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov

² Crimean Federal University named V.I. Vernadsky

Исследовано влияние смазочно-охлаждающих технологических средств растительного и животного происхождения на повышение стойкости режущего инструмента из быстрорежущей стали Р6М5К5 с износостойким покрытием TiN. В качестве обрабатываемого материала использована коррозионно-стойкая сталь 12Х18Н10Т. Повышение стойкости режущего инструмента обеспечено путем его приработки в среде экологичных смазочно-охлаждающих технологических средств. Приработка выполнена при температуре в зоне резания 200...400 °С, которую измеряли методом естественной термопары. Для обеспечения необходимого температурного диапазона разработан специальный стенд, позволяющий проводить тарировку естественной термопары непосредственно на токарном станке. Стойкостные испытания режущего инструмента выполнены в режимах, рекомендуемых для обработки коррозионно-стойких сталей с использованием водосмешиваемого 10%-ного смазочно-охлаждающего технологического средства Аквафриз-6. Показано, что приработка режущего инструмента в среде экологичных смазочно-охлаждающих технологических средств значительно влияет на повышение износостойкости режущего инструмента.

EDN: CRIHPV, <https://elibrary/crihvp>

Ключевые слова: экологичные смазочные средства, смазочно-охлаждающие технологические средства, приработка режущего инструмента, инструмент из быстрорежущей стали, износостойкое покрытие, стойкость режущего инструмента

In this article shows the influence of lubricating-cooling technological means of plant and animal origin on increasing the durability of cutting tools made of high-speed steel P6M5K5 with a wear-resistant TiN coating. Corrosion-resistant steel 12X18H10T was used as the processed material. Increased durability was ensured by running in the cutting tool in an environment of environmentally friendly lubricating-cooling technological means. The

^{*} Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-12-20013).

running-in process was carried out in the temperature range of 200–400 °C. The temperature in the cutting zone was measured using a natural thermocouple. To ensure the required temperature range, a special stand was developed that allows calibration of a natural thermocouple directly on a lathe. Durability tests of cutting tools were carried out in the modes recommended for processing stainless steels using a water-miscible 10% lubricating-cooling technological mean composition of the Аквафриз-6 brand. It was shown that running in the cutting tool in an environment of environmentally friendly lubricating-cooling technological means significantly affects the increase in the wear resistance of the cutting tool.

EDN: CRIHPV, <https://elibrary/crihvp>

Keywords: environmentally friendly lubricants, lubricating and cooling technological means, running in cutting tool, high-speed steel tools, wear-resistant coating, durability of cutting tool

Практика использования металлорежущих инструментов неразрывно связана с применением различных по составу покрытий, имеющих высокую износостойкость, а также достаточно удовлетворительную прочность, ударную вязкость, выносливость и трещиностойкость [1–6]. Однако, несмотря на очевидные достоинства износостойких покрытий, в металлообрабатывающей промышленности по-прежнему остается эффективным применение различных по составу смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС).

Тем не менее современные требования охраны труда и промышленной экологии направлены на сокращение использования масляных СОТС на основе минеральных масел, что обусловлено негативным воздействием таких составов на внешнюю среду и организм человека.

На основании приведенных доводов, появилась тенденция применения экологических СОТС, к которым относятся растительные масла и животные жиры [4, 7–10]. Однако такие СОТС значительно дороже минеральных, поэтому разрабатываются и внедряются специальные дозирующие устройства, позволяющие порционно с минимальным расходом подавать смазочный материал в зону резания [7, 11].

Несмотря на то, что основным действием таких СОТС является смазочное, обеспечивающее необходимое качество обработанной поверхности, отмечена трансформация поверхностных слоев режущего инструмента (РИ), приводящая к повышению стойкости, а, следовательно, и к снижению себестоимости изготовления готового изделия.

Анализ литературы. Применение различных по составу СОТС, которые обладают моющим, смазывающим, охлаждающим, пластифициру-

ющим, защитным и упрочняющим действием, направлено на повышение стойкости РИ.

Упрочняющее действие СОТС рассмотрено в публикациях [12, 13], где указано, что путем подбора различных технологических сред в результате изменения структуры зерен кристаллической решетки в поверхностно-активной среде и увеличения плотности дислокаций, можно сформировать упрочненный слой на поверхности РИ.

В работе [7] отмечено, что в исследованиях [14, 15], связанных с трансформацией контактных поверхностей РИ (структуры, микротвердости, плотности дислокаций и электрического сопротивления) показано, что контактные поверхности РИ в процессе обработки материалов резанием при повышенной температуре в зоне резания разупрочняются, а при пониженной температуре и высоком контактном давлении, упрочняются.

В трудах [7–9] установлено, что повышение контактного давления в среде масляных СОТС по сравнению с таковым при резании всухую достигает 60...80 %. В процессе резания нормальное давление на контактных поверхностях РИ составляет более 700 МПа, что заметно превышает нижнюю границу упрочнения 500 МПа. Применение же различных масел снижает температуру в зоне резания до 200...400 °C, что создает условия для повышения прочности контактных слоев. Формируемые на контактных поверхностях РИ упрочненные слои при обработке различных материалов в указанных (приработочных) условиях обеспечивают повышение стойкости РИ в 2–4 раза.

В работах [4, 7, 8, 15, 16] показано, что в процессе обработки материалов резанием на контактные поверхности РИ действуют температурные и контактные нагрузки, в результате чего рабочие поверхности изнашиваются,

находясь в трех состояниях — исходном I, упрочненном II и разупрочненном III [7], что показано на рис. 1. Здесь введены следующие обозначения: H_μ и $H_{\mu\text{исх}}$ — твердость и ее исходное значение; σ_b — предел прочности; ΔH_μ — приращение твердости,

$$\Delta H_\mu = \begin{cases} 0 & \text{при } 0^\circ\text{C} \leq \theta \leq 200^\circ\text{C}; \\ f_1(\sigma_N) & \text{при } 200^\circ\text{C} \leq \theta \leq 400^\circ\text{C}; \\ f_2(\sigma_N) & \text{при } \theta > 400^\circ\text{C}, \end{cases}$$

где $f_1(\sigma_N)$ — функция, возрастающая при выполнении условия $0,5 \text{ ГПа} \leq \sigma_N \leq \sigma_b$; σ_N — нормальное напряжение; $f_2(\sigma_N)$ — убывающая функция.

Зона I характеризуется относительно низкой температурой (до 200°C), вследствие чего деформационные процессы на контактных поверхностях затруднены, и исходная структура не претерпевает заметных изменений при износе — приращение твердости $\Delta H_\mu \approx 0$.

Зона III описывается процессами разупрочнения контактных слоев РИ ($\Delta H_\mu < 0$), которые стимулируют высокие значения температуры (более 400°C). Все меры, включая использование СОТС, направлены на снижение износа в этой зоне, а также замедление процессов разупрочнения и сохранение свойств исходной структуры инструментального материала.

Зона II охватывает диапазон температуры $200\dots 400^\circ\text{C}$, в котором испытания сталей деформационным нагружением обнаруживают так называемый горб прочности, отражающий превалирование процессов упрочнения над

разупрочняющими в зависимости $\sigma_b = f(\theta)$. При резании данный процесс стимулируется тем, что вследствие нагрева предел текучести инструментальной основы в его контактных слоях значительно падает, и действующие нагружающие напряжения оказываются достаточными для их пластической деформации.

Суть формирования вторичных упрочненных структур (состояние II) заключается в том, что под действием внешнего возмущения ответная реакция воспринимающей системы компенсирует причину, вызывающую это возмущение. При этом осуществляется структурная приспособляемость — образование вторичных структур, обладающих прочностными свойствами, превосходящими исходную.

В работах [7, 15, 16] отмечено, что формирование вторичных упрочненных структур является результатом возникновения такого явления природы, как самоорганизация. Для РИ из быстрорежущей стали в определенных условиях имеет место следующий механизм изнашивания, вытекающий из принципа самоорганизации процесса: силовая и тепловая нагрузки контакта $\rightarrow$ пластическая деформация контактных (локальных) микрообъемов $\rightarrow$ их упрочнение (включая образование химических соединений) $\rightarrow$ изнашивание (усталостное разрушение) исчерпавших запас пластичности адгезионных участков. Отмечено, чем больше степень упрочнения, тем меньше размеры вырываемых (изнашиваемых) частиц и износ в целом.

Цель работы — рассмотрение аспектов повышения стойкости РИ из быстрорежущей стали с износостойким покрытием путем применения экологических СОТС в период приработки.

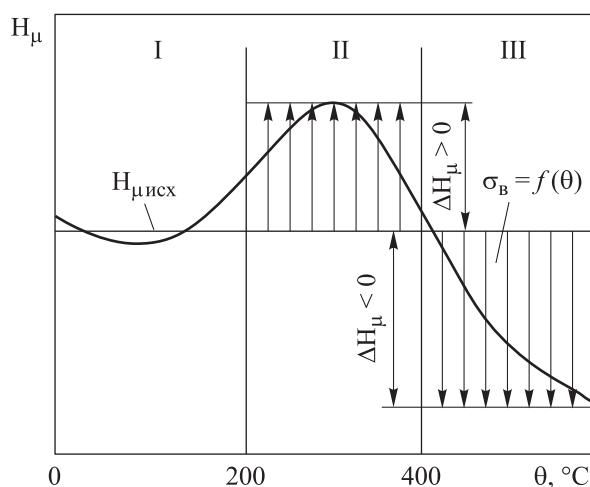


Рис. 1. Схема влияния температуры θ на трансформацию свойств контактных слоев РИ из быстрорежущей стали

Изложение основного материала. Экспериментальные исследования проводили на операции точения. В качестве РИ использовали токарный резец с четырехгранной сменной неплетачиваемой пластиной из быстрорежущей стали Р6М5К5. В рамках экспериментов также применяли режущие пластины с износостойким покрытием из нитрида титана (TiN). В качестве обрабатываемого материала выступала коррозионно-стойкая сталь 12Х18Н10Т.

Комплексное исследование предполагало измерение температурных параметров процесса резания, а также определение контактного взаимодействия РИ с обрабатываемой деталью путем замеров длины площадки пластичес-

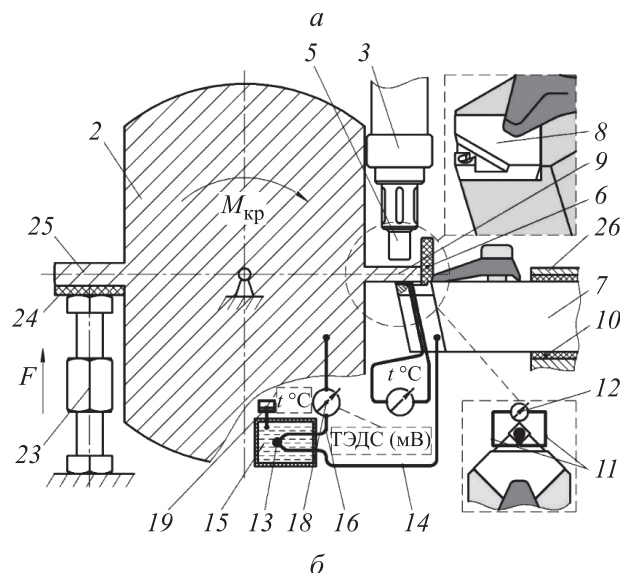
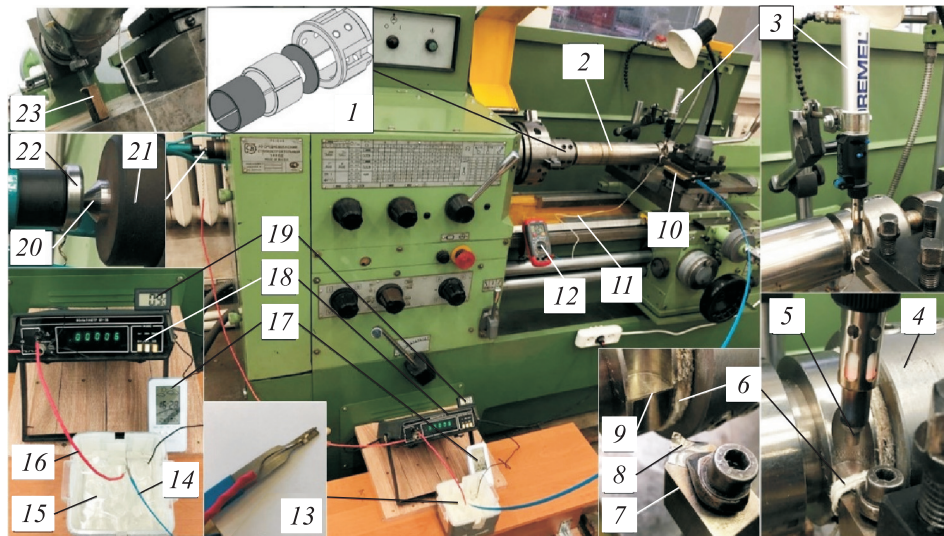


Рис. 2. Внешний вид (а) и схема (б) экспериментального стенда для тарирования естественной термопары резец — деталь, а также для исследования температуры в зоне резания при точении:

- 1, 4 — металлические стаканы; 2 — заготовка; 3 — нагревательный элемент; 5 — сопло; 6 — термостойкая перегородка; 7 — державка; 8 — металлорежущая пластина; 9, 25 — перегородки; 10, 24 — диэлектрические прокладки; 11 — контрольная термопара; 12 — мультиметр; 13 — холодный спай естественной термопары; 14 и 16 — электропроводы из инструментального и обрабатываемого материалов; 15 — емкость со льдом; 17 — термометр; 18 — милливольтметр; 19 — электронный градусник; 20 — металлический стержень; 21 — эбонитовая коническая втулка; 22 — металлический упор; 23 — прижимной винт; 26 — защитная металлическая прокладка; $M_{кр}$ — крутящий момент

кого $L_{п}$ и упругопластического $L_{у.п}$ контактов. Результаты исследования сопоставляли в ходе стойкостных испытаний РИ. Температуру в процессе резания измеряли методом естественной термопары. Державку токарного резца изготавливали из того же инструментального материала, что и режущую пластину (Р6М5К5) во избежание образования паразитных термоэлектродвижущих сил (ТЭДС).

Показания фиксировали с помощью универсального цифрового милливольтметра В7-38. Для повышения жесткости технологической системы станок — приспособление — инструмент — заготовка в процессе установки и закрепления обрабатываемой заготовки разработана оригинальная конструкция, описанная в патенте [17]. Также разработана оригинальная конструкция, позволяющая осуществлять та-

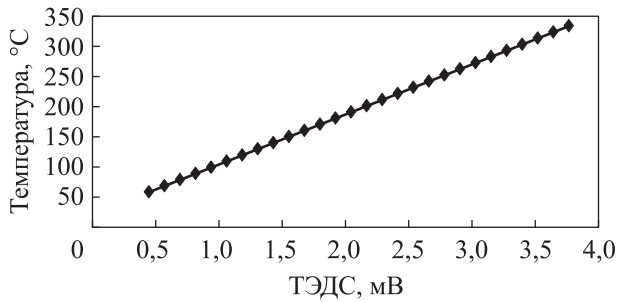


Рис. 3. Тарировочный график естественной термопары

рирование естественной термопары непосредственно на токарном станке [18] (рис. 2).

В результате тарирования естественной термопары получен тарировочный график, приведенный на рис. 3.

В качестве технологических сред использовали минеральное масло И-40А, растительные масла — подсолнечное (ПМ), рапсовое (РМ) и льняное (ЛМ) — и животный (свиной) жир (СЖ). Опыты проводили при постоянной глубине резания $t = 0,5$ мм и подаче $s = 0,2$ мм/об.

Стационарная скорость резания $v_{ст} = 23$ м/мин, скорость резания в процессе приработки $v_{пр} = 10$ м/мин. Время резания в процессе приработки $T_{пр} = 5$ мин.

Износ режущей пластины по задней поверхности измеряли каждые 5 мин с применением инструментального микроскопа ИМЦЛ 150×75(2), Б. Допустимым значением износа по задней поверхности РИ принимали $h_3 = 0,4$ мм в зоне нормального износа. Подачу СОТС в зону резания осуществляли в распыленном состоянии по технологии минимального смазывания с помощью дозирующего устройства Noga Minicool MMS.

Образование воздушно-масляной смеси реализовывалось по принципу Вентури. Для подачи жиров животного происхождения разработано оригинальное устройство, позволяющее подавать смазочный материал в распыленном состоянии [11]. Масла применяли в процессе приработки на протяжении 5 мин. После предварительной приработки дальнейшую эксплуатацию РИ проводили при стационарных режи-

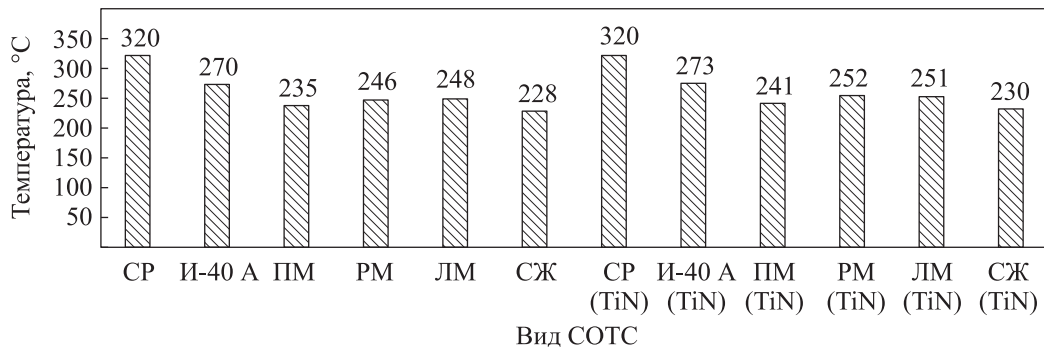


Рис. 4. Зависимость температуры в зоне резания от вида СОТС при точении заготовки в период приработки РИ со скоростью $v_{пр} = 10$ м/мин, подачей $s = 0,2$ мм/об и глубиной резания $t = 0,5$ мм

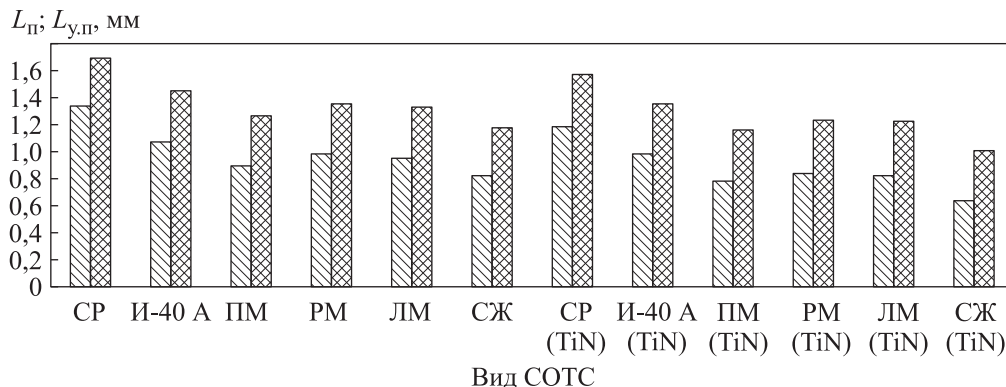


Рис. 5. Зависимости длин площадок пластического $L_{п}$ (штриховка) и упругопластического $L_{у.п}$ (сетка) контактов стружки с передней поверхностью РИ при точении заготовки в период приработки со скоростью $v_{пр} = 10$ м/мин, подачей $s = 0,2$ мм/об и глубиной резания $t = 0,5$ мм

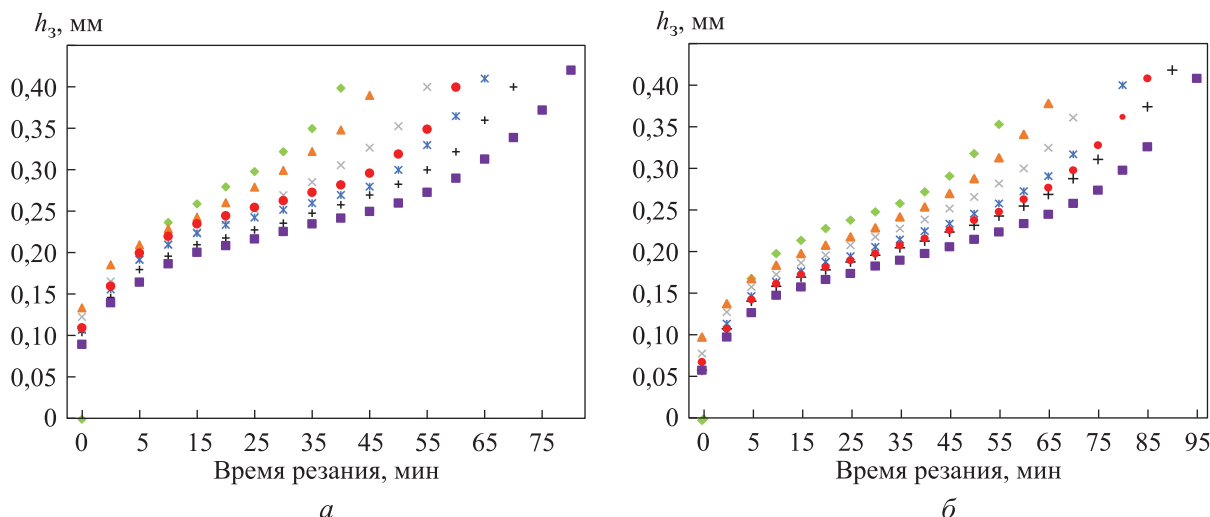


Рис. 6. Зависимости износа РИ по задней поверхности h_3 при отсутствии (а) и наличии (б) износостойкого покрытия от времени резания в стационарном режиме (▲) и после предварительной приработки с помощью различных СОТС:

◆ — аквафриз 6; × — И 40-А; * — РМ; ● — ЛМ; + — ПМ; ■ — СЖ

мах резания с использованием 10%-го состава водосмешиваемой СОТС марки Аквафриз-6.

Зависимость температуры в зоне резания от вида СОТС при точении заготовки в период приработки РИ со скоростью $v_{пр} = 10$ м/мин, подачей $s = 0,2$ мм/об и глубиной резания $t = 0,5$ мм приведена на рис. 4, где СР — сухое резание.

Как видно из рисунка, снижение температуры в зоне резания с применением растительных масел (ПМ, РМ, ЛМ) и СЖ имеет более выраженный характер, чем с использованием минерального масла И-40А. Лучшее смазочное действие биожиров приводит к изменению угла наклона поверхности фактического сдвига и уменьшению размеров зоны вторичной деформации на передней поверхности РИ без износостойкого покрытия, что в свою очередь облегчает процесс пластической деформации, которая является основным источником теплообразования в зоне резания [19].

О сокращении зоны вторичной деформации свидетельствуют замеры длин площадок контакта стружки с передней поверхностью РИ (рис. 5). Наименьшие значения длин коррелируют с наименьшими значениями средних температур зоны резания (см. рис. 4). Эти значения получены в среде ПМ и СЖ. Кроме того, сокращение длины площадки контакта приводит к росту удельных контактных нагрузок на передней поверхности РИ, способствующих упрочнению его поверхностных слоев.

Несколько большие значения средней температуры получены при обработке РИ с изно-

стойким покрытием (TiN), что обусловлено наличием большого температурного градиента у покрытия TiN, препятствующего отводу тепла в тело РИ.

Зависимости износа РИ по задней поверхности h_3 при отсутствии и наличии износостойкого покрытия от времени резания в стационарном режиме и после предварительной приработки с помощью различных СОТС приведены на рис. 6. Приработку выполняли в следующем режиме: $v_{пр} = 10$ м/мин; $s = 0,2$ мм/об и $t = 0,5$ мм. Расход И-40 А, ПМ, РМ, ЛМ и СЖ при приработке составлял 4,5 мл/мин, расход аквафриза 6 в стационарном режиме при $v_{ст} = 23$ м/мин — 5,0 л/мин.

Анализ результатов стойкостных испытаний после предварительной приработки РИ показал эффективность применения ПМ и СЖ в качестве СОТС. Время достижения критериального значения износа РИ без износостойкого покрытия, приработанного в этих средах, по сравнению с таковым при резании неприработанным РИ увеличилось с 40 до 70 и 80 мин соответственно. При резании РИ с покрытием в среде ПМ и СЖ его стойкость повысилась по сравнению со стойкостью неприработанного РИ с 60 до 90 и 95 мин соответственно.

Выводы

1. Проведенная оценка смазывающего действия масляных технологических сред как фактора, обуславливающего упрочнение контакт-

ных слоев РИ в режиме приработки, открывает новые пути их эффективного применения в качестве СОТС. С одной стороны, с учетом снижения расхода СОТС при использовании дозирующих устройств расширяется область внедрения в промышленность экологичных масел растительной природы, с другой — формируется основа для модификации специальных прирабочных составов, эксплуатация которых позволит повысить стойкость РИ в целом.

2. Также представляет интерес влияние растительных масел и животных жиров при изменении соотношения зон пластического и упруго-

гопластического контакта и напряженно-деформированного состояния зоны резания на процесс стружкообразования, отражающийся на шероховатости обработанных поверхностей. С учетом постоянного износа РИ в процессе резания становится немаловажным непосредственный контроль качества обрабатываемой поверхности. Для прецизионных деталей промежуточный контроль параметров качества следует выполнять до смены станова.

3. Изучение этих вопросов станет материалом дальнейших исследований.

Литература

- [1] Верещака А.А., Верещака А.С., Седых М.И. *Режущие инструменты с модифицирующими износостойкими комплексами*. Москва, Станкин, 2014. 194 с.
- [2] Табаков В.П., Верещака А.С., Григорьев С.Н. *Функциональные параметры процесса резания режущим инструментом с износостойкими покрытиями*. Ульяновск, УлГТУ, 2012. 172 с.
- [3] Чихранов А.В. *Повышение работоспособности режущего инструмента путем разработки и применения многоэлементных износостойких покрытий на основе модифицированного нитрида титана*. Дисс. ... канд. тех. наук. Ульяновск, УлГТУ, 2006. 314 с.
- [4] Якубов Ф.Я., Якубов Ч.Ф., Скакун В.В. Экспериментальная оценка эффективности смазывающих технологических сред в периоде приработки металлорежущего инструмента. *Известия ТулГУ. Сер. Технические науки*, 2016, № 8–1, с. 246–253.
- [5] Соболев А.А., Кадочкин Д.С., Чаусов В.Н. Износостойкие покрытия для режущего инструмента. *Технические науки — от теории к практике*, 2013, № 29, с. 99–103.
- [6] Табаков В.П., Сизов С.В., Чихранов А.В. Новые износостойкие покрытия режущего инструмента на основе нитрида ниобия. *Вестник РГТА имени П.А. Соловьева*, 2017, № 2, с. 235–240.
- [7] Якубов Ч.Ф. *Повышение износостойкости быстрорежущих инструментов путем направленной трансформации их исходных свойств*. Дисс. ... канд. тех. наук. Харьков, ХПИ, 2004. 146 с.
- [8] Якубов Ч.Ф., Ким В.А., Самар Е.В. и др. Влияние СОТС на деформационные процессы формирования поверхностных структур при резании. *Металлообработка*, 2019, № 6, с. 3–10, doi: <https://doi.org/10.25960/mo.2019.6.3>
- [9] Голубков Ю.В., Ермолаева Н.В., Могусева М.С. Альтернативные смазочно-охлаждающие материалы на основе растительных масел. *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*, 2014, № 1, с. 32–35.
- [10] Жорник В.И., Ивахник А.В., Запольский А.В. Экологически безопасные смазочные материалы на основе смеси растительного и минерального масел. *Вестник Витебского государственного технологического университета*, 2022, № 1, с. 99–114, doi: <https://doi.org/10.24412/2079-7958-2022-1-99-114>
- [11] Скакун В.В., Ким В.А., Якубов Ч.Ф. и др. Устройство для подачи смазывающих технологических сред. Патент РФ 202624. Заявл. 12.08.2020, опубл. 01.03.2021.
- [12] Ящерицын П.И., Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. *Теория резания*. Москва, Новое знание, 2006. 512 с.
- [13] Маслов А.Р., Схиртладзе А.Г. *Обработка труднообрабатываемых материалов резанием*. Москва, Инновационное машиностроение, 2018. 208 с.
- [14] Розенберг Ю.А. *Резание материалов*. Курган, Полиграфический комбинат, 2007. 294 с.
- [15] Якубов Ф.Я. *Пути повышения стойкости металлорежущих инструментов на основе анализа термодинамики контактных процессов*. Дисс. ... док. тех. наук. Ташкент-Тбилиси, 1984. 414 с.

- [16] Якубов Ф.Я., Ким В.А. *Структурно-энергетические аспекты упрочнения и повышения стойкости режущего инструмента*. Симферополь, Крымучпедгиз, 2005. 300 с.
- [17] Скакун В.В., Джемалядинов Р.М., Акимов С.Н. *Способ измерения термо-ЭДС при точении*. Патент РФ 2746316. Заявл. 12.10.2020, опубл. 12.04.2021.
- [18] Скакун В.В., Джемалядинов Р.М. *Способ тарирования естественной термонапы резац-деталь*. Патент РФ 2734315. Заявл. 14.05.2020, опубл. 15.10.2020.
- [19] Бобров В.Ф. *Основы теории резания металлов*. Москва, Машиностроение, 1975. 344 с.

References

- [1] Vereshchaka A.A., Vereshchaka A.S., Sedykh M.I. *Rezhushchie instrumenty s modifitsiruyushchimi iznosostoykimi kompleksami* [Cutting tools with modifying wear-resistant complexes]. Moscow, Stankin Publ., 2014. 194 p. (In Russ.).
- [2] Tabakov V.P., Vereshchaka A.S., Grigoryev S.N. *Funktsionalnye parametry protsessa rezaniya rezhushchim instrumentom s iznosostoykimi pokrytiyami* [Functional parameters of the cutting process by cutting tools with wear-resistant coatings]. Ulyanovsk, UIGTU, 2012. 172 p. (In Russ.).
- [3] Chikhranov A.V. *Povyshenie rabotosposobnosti rezhushchego instrumenta putem razrabotki i primeneniya mnogoelementnykh iznosostoykikh pokrytiy na osnove modifitsirovannogo nitrida titana*. Diss. kand. tekhn. nauk [Increase of serviceability of cutting tools by development and application of multi-element wear-resistant coatings based on modified titanium nitride. Kand. tech. sci. diss.]. Ulyanovsk, UIGTU, 2006. 314 p. (In Russ.).
- [4] Yakubov F.Ya., Yakubov Ch.F., Skakun V.V. Experimental evaluation of lubricating fluids during the running of cutting tools. *Izvestiya TulGU. Ser. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Sciences], 2016, no. 8–1, pp. 246–253. (In Russ.).
- [5] Cobolev A.A., Kadochkin D.S., Chausov V.N. Wear resistant coating for cutting tool. *Tekhnicheskie nauki - ot teorii k praktike*, 2013, no. 29, pp. 99–103. (In Russ.).
- [6] Tabakov V.P., Sizov S.V., Chikhranov A.V. New edge tool wear-resistant coatings on the basis of niobium nitride. *Vestnik RGATA imeni P.A. Solovyeva*, 2017, no. 2, pp. 235–240. (In Russ.).
- [7] Yakubov Ch.F. *Povyshenie iznosostoykosti bystrorezhushchikh instrumentov putem napravlennoy transformatsii ikh iskhodnykh svoystv*. Diss. kand. tekhn. nauk [Increasing wear resistance of high-speed cutting tools by directed transformation of their initial properties. Kand. tech. sci. diss.]. Kharkov, KhPI Publ., 2004. 146 p. (In Russ.).
- [8] Yakubov Ch.F., Kim V.A., Samar E.V. et al. Influence of the lubricating and cooling process medium on the deformation processes of surface structures formation during cutting. *Metalloobrabotka* [Metalworking], 2019, no. 6, pp. 3–10, doi: <https://doi.org/10.25960/mo.2019.6.3> (in Russ.).
- [9] Golubkov Yu.V., Ermolaeva N.V., Moguseva M.S. Equipment and technologies for oil and gas complex alternative lubricating-cooling materials on vegetable oil basis. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa* [Equipment and Technologies for Oil and Gas Complex], 2014, no. 1, pp. 32–35. (In Russ.).
- [10] Zhornik V.I., Ivakhnik A.V., Zapolskiy A.V. Environmentally friendly lubricants based on the mixture of the vegetable and mineral oils. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta* [Vestnik of Vitebsk State Technological University], 2022, no. 1, pp. 99–114, doi: <https://doi.org/10.24412/2079-7958-2022-1-99-114> (in Russ.).
- [11] Skakun V.V., Kim V.A., Yakubov Ch.F. et al. *Ustroystvo dlya podachi smazyvayushchikh tekhnologicheskikh sred* [Device for supplying lubricating technological media]. Patent RU 202624. Appl. 12.08.2020, publ. 01.03.2021. (In Russ.).
- [12] Yashcheritsyn P.I., Feldshteyn E.E., Kornievich M.A. *Teoriya rezaniya* [Theory of cutting]. Moscow, Novoe znanie Publ., 2006. 512 p. (In Russ.).
- [13] Maslov A.R., Skhirtladze A.G. *Obrabotka trudnoobrabatyvaemykh materialov rezaniem* [Processing of hard-to-machine materials by cutting]. Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2018. 208 p. (In Russ.).
- [14] Rozenberg Yu.A. *Rezanie materialov* [Cutting of materials]. Kurgan, Poligraficheskiy kombinat Publ., 2007. 294 p. (In Russ.).

- [15] Yakubov F.Ya. *Puti povysheniya stoykosti metallovezhushchikh instrumentov na osnove analiza termodinamiki kontaktnykh protsessov*. Diss. dok. tekhn. nauk [Ways of increase of durability of metal-cutting tools on the basis of the analysis of thermodynamics of contact processes. Doc. tech. sci. diss.]. Tashkent-Tbilisi, 1984. 414 p. (In Russ.).
- [16] Yakubov F.Ya., Kim V.A. *Strukturno-energeticheskie aspekty uprochneniya i povysheniya stoykosti rezhushchego instrumenta* [Structural-energetic aspects of hardening and increase of durability of cutting tools]. Simferopol, Krymchpedgiz Publ., 2005. 300 p. (In Russ.).
- [17] Skakun V.V., Dzhemalyadinov R.M., Akimov S.N. *Sposob izmereniya termo-EDS pri tochenii* [Method for measuring thermo-EMF during turning]. Patent RU 2746316. Appl. 12.10.2020, publ. 12.04.2021. (In Russ.).
- [18] Skakun V.V., Dzhemalyadinov R.M. *Sposob tarirovaniya estestvennoy termopary rezets-detali* [Method of calibration natural thermocouple cutter-part]. Patent RU 2734315. Appl. 14.05.2020, publ. 15.10.2020. (In Russ.).
- [19] Bobrov V.F. *Osnovy teorii rezaniya metallov* [Fundamentals of metal cutting theory]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1975. 344 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 16.05.2024

Информация об авторах

СКАКУН Владимир Владимирович — преподаватель кафедры «Технология машиностроения». ГБОУ ВО Республики Крым «Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова» (295015, Симферополь, Республика Крым, Российская Федерация, пер. Учебный, 8); младший научный сотрудник кафедры общей физики. Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского (295007, Симферополь, Республика Крым, Российская Федерация, просп. Академика Вернадского, д. 4, e-mail: vladimir.skakun.92@list.ru).

ДЖЕМАЛЯДИНОВ Руслан Марленович — преподаватель кафедры «Технология машиностроения». ГБОУ ВО Республики Крым «Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова» (295015, Симферополь, Республика Крым, Российская Федерация, пер. Учебный, 8); младший научный сотрудник кафедры общей физики. Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского (295007, Симферополь, Республика Крым, Российская Федерация, просп. Академика Вернадского, д. 4, e-mail: rus.dzhemalyadinov@mail.ru).

АЛИЕВ Азиз Ибрагимович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения». ГБОУ ВО Республики Крым «Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова» (295015, Симферополь, Республика Крым, Российская Федерация, пер. Учебный, 8); ведущий научный сотрудник кафедры общей физики. Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского (295007, Симферополь, Республика Крым, Российская Федерация, просп. Академика Вернадского, д. 4, e-mail: alievaziz2704@gmail.com).

Information about the authors

SKAKUN Vladimir Vladimirovich — Lecturer, Department of Mechanical Engineering Technology. Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov (295015, Simferopol, Russian Federation, Crimea, Uchebnyy side street, 8); Junior Research Fellow, Department of General Physics. Crimean Federal University named V.I. Vernadsky (295007, Simferopol, Russian Federation, Crimea, Ave. Academician Vernadsky, Bldg. 4, e-mail: vladimir.skakun.92@list.ru).

DZHEMALYADINOV Ruslan Marlenovich — Lecturer, Department of Mechanical Engineering Technology. Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov (295015, Simferopol, Crimea, Russian Federation, Uchebnyy side street, 8); Junior Research Fellow, Department of General Physics. Crimean Federal University named V.I. Vernadsky (295007, Simferopol, Russian Federation, Crimea, Ave. Academician Vernadsky, Bldg. 4, e-mail: rus.dzhemalyadinov@mail.ru).

ALIEV Aziz Ibrahimovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology. Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov (295015, Simferopol, Crimea, Russian Federation, Uchebnyy side street, 8); Leading Researcher, Department of General Physics. Crimean Federal University named V.I. Vernadsky (295007, Simferopol, Russian Federation, Crimea, Ave. Academician Vernadsky, Bldg. 4, e-mail: alievaziz2704@gmail.com).

ЕГОРОВ Юрий Александрович — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики. Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского (295007, Симферополь, Республика Крым, Российская Федерация, просп. Академика Вернадского, д. 4, e-mail: yuriyegorov@cfuv.ru).

EGOROV Yuriy Alexandrovich — Candidate of Science (Phys.-Math), Associate Professor, Department of General Physics. Crimean Federal University named V.I. Vernadsky (295007, Simferopol, Russian Federation, Crimea, Ave. Academician Vernadsky, Bldg. 4, e-mail: yuriyegorov@cfuv.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Скакун В.В., Джемалыдинов Р.М., Алиев А.И., Егоров Ю.А. Качественные изменения поверхностного слоя металлорежущего инструмента с износостойким покрытием путем применения экологичных смазывающих технологических сред. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 2, с. 41–50.

Please cite this article in English as:

V.V. Skakun, R.M. Dzhemalyadinov, A.I. Aliyev, Yu.A. Egorov. Qualitative changes in the surface layer of metal cutting tools with wear-resistant coating by using environmentally friendly lubricating technological environments. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 2, pp. 41–50.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям монографию
«Технологические процессы
лазерной поверхностной обработки»**

Авторы: А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюрлов

В монографии в большом объеме рассмотрены лазерные технологические процессы обработки поверхностей металлических деталей и изделий. Описаны технологии лазерной термической обработки сталей, титановых, алюминиевых, медных и других сплавов. Показано влияние параметров режимов непрерывной и импульсной закалки на структуру и получаемые свойства поверхностей. Подробно представлен малоизвестный процесс импульсного ударного упрочнения материалов. Рассмотрены основы физики этого процесса, а также влияние параметров и условий обработки на остаточные напряжения, микроструктуру и механические свойства материала. Большое внимание уделено технологиям модифицирования поверхности лазерным легированием и наплавкой. Приведены результаты исследований и внедренных технологий нанесения порошков из тугоплавких материалов, карбидов и нитридов на поверхность сталей, чугунов и цветных металлов. Показано влияние технологических факторов на структуру, свойства и трещиностойкость нанесенных слоев. Даны физическое представление о процессе лазерного полирования металлических поверхностей различных материалов, а также технология его осуществления.

Для инженерно-технических работников, использующих технологические лазеры, а также для студентов высших учебных заведений машиностроительных специальностей.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>