

Научная статья  
Статья в открытом доступе  
УДК 621.9  
doi: 10.30987/2782-5957-2022-4-23-32

## ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИОННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ИНДЕНТОРА ИНСТРУМЕНТА С ПОВЕРХНОСТЬЮ ДЕТАЛИ ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕТОДАМИ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Владимир Павлович Федоров<sup>1</sup>, Максим Николаевич Нагоркин<sup>2✉</sup>

<sup>1, 2</sup> Брянский государственный технический университет: 241035, Россия, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, д. 7.

<sup>1</sup> fedorvlad44@mail.ru; orcid.org/0000-0003-2113-6567

<sup>2</sup> nagorkin\_mn@mail.ru; orcid.org/0000-0002-4536-7522

### Аннотация

В статье представлены результаты исследований параметров контактного взаимодействия между индентором инструмента и обрабатываемой поверхностью деталей при обработке методами поверхностного пластического деформирования алмазным выглаживанием и накатыванием шариками. Изменение технологических факторов алмазного выглаживания и накатывания при сравнительно равных условиях обработки по-разному влияют на формирование топографии и параметров микропрофиля. Это обусловлено характером контактирования индентора с поверхностью. При алмазном выглаживании индентор жестко закреплен в держателе инструмента, при накатывании шариком индентор вращается. Соответственно, для выглаживания превалирует процесс трения скольжения, для накатывания – трения качения. Силы трения в зоне контакта индентора инструмента с поверхностью детали влияют на процессы. Коэффициент трения зависит от деформационной и адгезионной составляющих. На процессы пластической деформации

металла, на качество обрабатываемой поверхности и другие параметры обработки в зоне контакта индентора с обрабатываемой поверхностью большое влияние оказывают прочность адгезионной связи и молекулярная составляющая коэффициента трения. Значения этих факторов определяются сочетанием материалов контактирующих поверхностей. Нередко такая информация отсутствует в справочной и научной литературе, а теоретические расчеты не позволяют учесть реальные факторы обработки. В статье представлена методика и некоторые результаты исследований молекулярной составляющей коэффициента трения, удельной прочности адгезионной связи и пьезокоэффициента в зоне контакта индентора с поверхностью при алмазном выглаживании и накатывании шариками. Представленные результаты определяют научную новизну статьи.

**Ключевые слова:** выглаживание, накатывание, деформация, индентор, взаимодействие, коэффициент, трение, адгезионная связь.

Ссылка для цитирования:

Федоров В.П. Исследование адгезионной составляющей коэффициента трения индентора инструмента с поверхностью детали при обработке методами поверхностного пластического деформирования / В. П. Федоров, М. Н. Нагоркин // Транспортное машиностроение. – 2022. - № 4. – С. 23–32. doi: 10.30987/2782-5957-2022-4-23-32.

Original article  
Open Access Article

## STUDY OF THE ADHESIVE COMPONENT OF THE FRICTION COEFFICIENT OF THE TOOL INDENTER WITH THE PART SURFACE WHILE MACHINING BY METHODS OF SURFACE PLASTIC DEFORMATION

Vladimir Pavlovich Fedorov<sup>1</sup>, Maksim Nikolaevich Nagorkin<sup>2✉</sup>

<sup>1, 2</sup> Bryansk State Technical University: 7, 50 let Oktyabrya Boulevard, Bryansk, Russia, 241035.

<sup>1</sup> fedorvlad44@mail.ru; orcid.org/0000-0003-2113-6567

<sup>2</sup> nagorkin\_mn@mail.ru; orcid.org/0000-0002-4536-7522

The paper presents the results of studying the parameters of the contact interaction between the tool indenter and the work surface of parts while machining by methods of surface plastic deformation by diamond smoothing and ball burnishing. Changes in the technological factors of diamond smoothing and burnishing under relatively equal machining conditions have different effects on the formation of the topography and parameters of the microprofile. This is due to the contact character of the indenter with the surface. When diamond smoothing, the indenter is rigidly fixed in the tool holder, whereas for ball burnishing the indenter rotates. Accordingly, sliding friction prevails for smoothing, and rolling friction prevails for burnishing. Friction forces in the contact area of the tool indenter with the surface of the part affect the processes. Friction coefficient depends on the deformation and adhesive components. The processes of plastic deformation of metal, the quality of the work surface and other machining parameters in the contact area of the indenter

with the work surface are greatly influenced by the strength of the adhesive bond and the molecular component of the friction coefficient. The values of these factors are determined by the combination of materials of the contacting surfaces. This information is often not available in the reference and scientific sources, and theoretical calculations do not allow taking into account real machining factors. The paper presents the methodology and some results of studying the molecular component of the friction coefficient, the specific strength of the adhesive bond and the pressure coefficient in the contact area of the indenter with the surface during diamond smoothing and ball burnishing. The presented results give the scientific novelty of the paper.

**Keywords:** smoothing, burnishing, deformation, indenter, interaction, coefficient, friction, adhesive bond.

*Reference for citing:*

*Fedorov VP, Nagorkin MN. Study of the adhesive component of the friction coefficient of the tool indenter with the part surface while machining by methods of surface plastic deformation. - Transport Engineering. – 2022 – P. 23 -32 . doi: 10.30987/2782-5957-2022-4-23-32.*

## Введение

В машиностроении для повышения эксплуатационных свойств поверхностей деталей (например, усталостная прочность, контактная жесткость, износостойкость и др.) широко применяются методы обработки деталей поверхностным пластическим деформированием (ППД). Простыми и эффективными являются алмазное выглаживание неподвижным индентором и накатывание сферическим вращающимся индентором (шариком) [1–3 и др.], которые закреплены в держателе инструмента упругого действия.

В процессе технологической подготовки производства проектирование процессов изготовления изделий связано с выбором методов обработки деталей из множества альтернативных. Критерии выбора определяются технологом в зависимости от количества информации об анализируемых процессах, протекающих в

процессе обработки, технологических возможностях рассматриваемых методов по формированию требуемых параметров качества и др. Несмотря на достаточную изученность методов алмазного выглаживания и накатывания, иногда сложно найти требуемую информацию о параметрах контактного взаимодействия инденторов инструментов с обрабатываемой поверхностью, необходимых для расчета ряда показателей процессов обработки. При анализе процессов контактного взаимодействия индентора с поверхностью необходимо учитывать прочность адгезионной связи и молекулярную составляющую коэффициента трения [4, 5]. Для прогнозирования результатов обработки деталей машин указанными методами значительный интерес представляют результаты исследований этих факторов.

## Особенности формирования поверхности детали при ППД

Процессы алмазного выглаживания (АВ) и накатывания шариком (НШ) отличаются характером трения (скольжения и качения) индентора с поверхностью обработки, что влияет в определенной степени на характер формируемой топографии поверхности и ее физико-механические свойства [1, 4, 6–10].

На рис. 1 представлены примеры

микропрофилей и микрорельефов плоских поверхностей деталей (чугун СЧ20), полученных после обработки шлифованием периферий абразивного круга с последующим АВ. При обработке происходит процесс охрупчивания неровностей поверхности и заполнение продуктами разрушения впадин между микронеровностями. При увеличении силы  $Q$  выглаживания на по-

верхности наблюдается рост размеров «макрорёрен», что видно по их паутинообразным границам (рис. 1б, е).

Чрезмерное увеличение силы  $Q$  приводит к перенаклёпу поверхности и разрушению отдельных микрообъёмов (характерно для чугуна) или возникновению волнистости (характерно для пластичных материалов). Перенаклёп поверхности детали из чугуна может являться причиной появления на ней дефектов в виде «кратеров», росту высотных параметров шероховатости (рис. 1е) [6]. Дефекты поверхностей в виде «кратеров» наблюдаются как после шлифования (1, рис. 1а), так и после АВ (2, 3 рис. 1в). Эти дефекты образуются после АВ (или НШ) при силовой интенсификации обработки или могут наследоваться [7].

Также при АВ может наблюдаться процесс «размазывания» исходных микронеровностей по поверхности (рис. 1б, г, е), схожий с процессом наростообразования. При НШ этот процесс практически отсутствует, но наблюдается раскатывание исходных неровностей (рис. 1в, д). Такое различие связано с тем, что при АВ преобладает процесс трения скольжения, при НШ – процесс трения качения.

Профилограммы поперечного профиля поверхности (направление «Т», рис. 1)) показывают, что при увеличении силы

$Q$  высотные параметры шероховатости снижаются после обработки АВ и НШ. Интенсивность снижения значений высотных параметров больше при АВ.

Исследования, проводившиеся при обработке плоских поверхностей деталей из чугуна методами ППД после торцевого фрезерования синтетическими сверхтвёрдыми материалами, показали аналогичную физическую картину формирования микрорельефа [10].

При выглаживании плоских поверхностей стальных деталей (сталь 45), предварительно обработанных шлифованием периферией круга, следов процесса «охрупчивания» или «размазывания» материала по поверхности не наблюдалось.

Таким образом, алмазное выглаживание характеризуется «размазыванием» материала исходных неровностей по поверхности в результате «охрупчивания» микронеровностей и микрорастрескивания поверхности (для чугуна) или пластического деформирования исходных микронеровностей (для стали). Для процесса накатывания шариками характерно «раскатывание» материала исходных неровностей по поверхности.

Формирование различной текстуры обрабатываемых поверхностей определяет различие их эксплуатационных свойств.

### Методика диагностики адгезионных связей в зоне контакта индентора с поверхностью

При обработке ППД силы трения в зоне контакта индентора инструмента с поверхностью детали влияют на процесс пластической деформации металла, изменение температуры, показатели качества поверхностного слоя и др. [1]. Коэффициент трения зависит от значения коэффициента  $f_{\text{деф}}$ , определяемого процессом деформирования поверхностного слоя, и значения коэффициента  $f_{\text{адг}}$ , определяемого показателями адгезионных связей между индентором и поверхностью [8]:

$$f = f_{\text{деф}} + f_{\text{адг}} \quad (1)$$

Деформационная составляющая коэффициента трения определяется силой  $P$  обработки ППД, глубиной  $h$  внедрения индентора, поверхностной микротвёрдостью, радиусом  $r$  индентора.

Величина адгезионной составляющей

коэффициента трения зависит от свойств обрабатываемого материала и параметров шероховатости поверхности. Адгезионную составляющую теоретически рассчитать трудно, поэтому ее обычно определяют экспериментально [8].

Для анализа процессов контактного взаимодействия индентора с обрабатываемой поверхностью необходимо определить такие показатели, как прочность адгезионной связи, молекулярная составляющая коэффициента трения и др. Проводились исследования процессов обработки поверхностей деталей методами алмазного выглаживания инденторами из синтетических сверхтвёрдых материалов (АСПК) и накатыванием шариками из стали ШХ15 с целью определения этих показателей.

Прочность на срез адгезионной связи и молекулярная составляющая коэффициента трения  $f_m$  зависят от материалов по-

верхностей, контактирующих друг с другом [9], в случае обработки ППД – от обрабатываемого материала и материала индентора.

Коэффициент  $f_m$  рассчитывается по зависимости [11]:

$$f_m = \frac{\tau_{\text{п}}}{P_r} = \frac{\tau_0}{P_r} + \beta, \quad (2)$$

где  $\tau_{\text{п}}$  – сдвиговая прочность молекулярных связей;  $\tau_0$  – удельная сдвиговая прочность молекулярных связей при нормальном давлении в зоне контакта индентора с поверхностью, равном к нулю;  $P_r$  – нормальное давление в зоне контакта;  $\beta$  – пьезокоэффициент, учитывающий изменение молекулярной составляющей коэффициента трения при изменении нормального давления.

Молекулярная составляющая коэф-

фициента трения алмазного индентора с поверхностью влияет на формирование параметров её качества независимо от процессов, протекающих при обработке: микрорезания, наволакивания, пластического оттеснения и т.п. Поэтому, для обеспечения требуемых параметров качества поверхностного слоя материал индентора инструмента ППД должен иметь минимальные значения  $\tau_n$  и  $f_m$ .

На рис. 2 представлена схема лабораторной установки, с помощью которой по методике, изложенной в [2], проводились исследования.

В качестве инденторов применялись стандартные вставки из алмаза синтетического поликристаллического (АСПК, радиусом  $r = 3 \text{ мм}$ ) и шарики из стали ШХ-15.

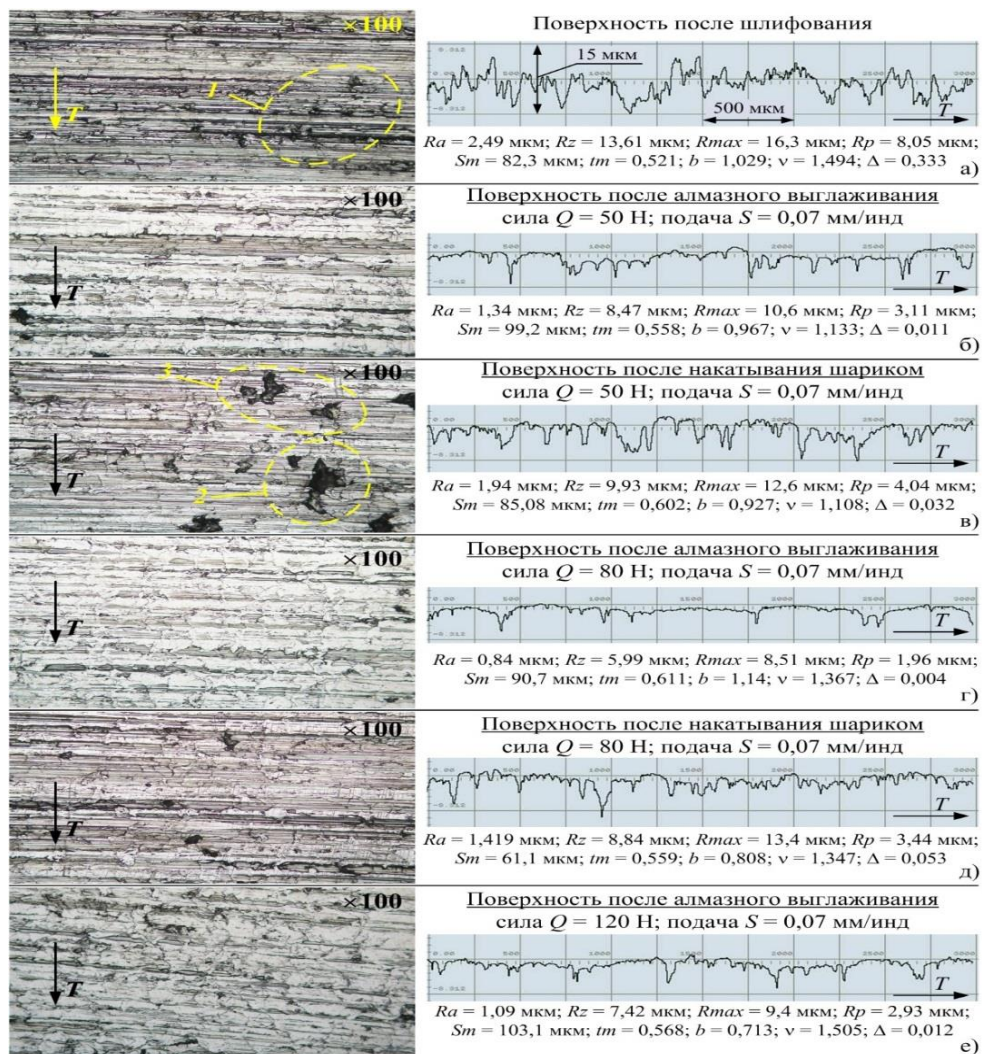


Рис. 1. Вид микрорельефа и профилограммы плоских поверхностей деталей из чугуна СЧ20, полученных алмазным выглаживанием и накатыванием шариком (радиус инденторов  $r = 3,5 \text{ мм}$ ) после шлифования периферией абразивного круга

Fig. 1. Microrelief formation and microprofiling of flat surfaces of parts made of cast iron GG20 by diamond burnishing and roll burnishing (radius of indentors  $r = 3,5 \text{ мм}$ ) after peripheral grinding

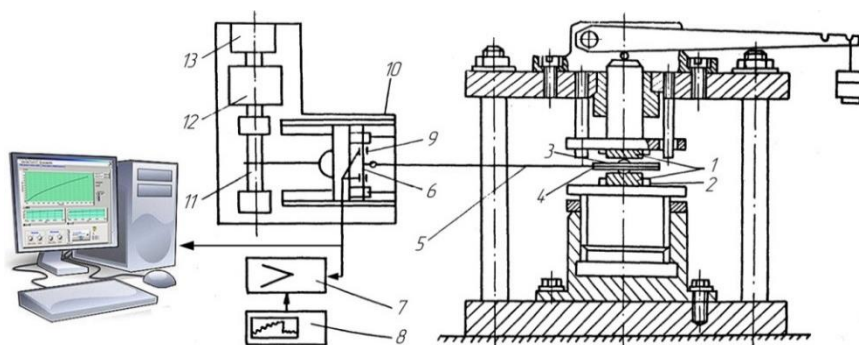


Рис. 2. Схема установки для определения адгезионной составляющей коэффициента трения  
 Fig. 2. Installation diagram for measuring the adhesive component of the friction ratio

Индентор 3 (радиус  $r = 3$  мм), закрепленный в дисковой обойме 4 сжимается между плоскими образцами 1. Тросик 5, размещенный в круговом пазе обоймы, связывает ее с тензобалкой 9. При вращении индентора датчики на тензобалке регистрируют значение действующей тангенциальной силы. Измерение осуществляется тензометрическим усилителем 7 модели ТА-5, полученная информация передается через блок аппаратно-программного интерфейса в память компьютера для дальнейшей интерпретации с помощью программы «Осциллограф» [2, 12]. Тензобалка 9 в процессе измерения

тангенциальной силы перемещается по направляющим 10. Привод движения тензобалки включает асинхронный двигатель 13, редуктор 12, вал 11, на который наматывается тросик, тянущий тензобалку.

На рис. 3 представлен общий вид дисковой обоймы с инденторами.

Молекулярная составляющая коэффициента трения должна быть постоянной по величине. Для этого значение нормальной нагрузки в зоне контакта индентора с образцами должно быть таким, чтобы возникающие средние напряжения были равны твердости (по Бринеллю) материала образцов.

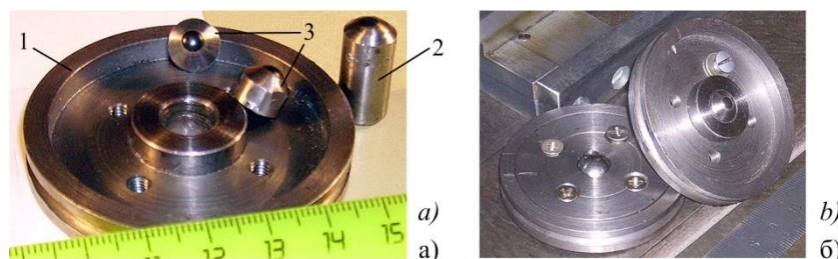


Рис. 3. Дисковая обойма с инденторами: а – блок с инденторами в разобранном состоянии; б – блок инденторов в сборе; 1 – обойма; 2 – выглаживатель из АСПК; 3 – инденторы  
 Fig. 3. Disk-shaped shell with indentors: a – mount with indentors in the disassembled condition; b – mount with indentors in the assembled condition; 1 – shell; 2 – standard inserts made of synthetic polycrystalline diamond; 3 – indentors

По результатам эксперимента по схеме на рис. 4 рассчитываются значения прочности на срез адгезионных связей  $\tau_n$  и коэффициент  $f_m$ , учитывающий молекулярную составляющую коэффициента трения:

$$\tau_n = \frac{3F_o R_o}{4\pi r_o^3}, f_m = \frac{3F_o R_o}{4r_o N}. \quad (3)$$

Здесь  $F_o$  – окружное усилие на дисковой обойме, действующее в момент трогания с места индентора [2];  $R_o$  – радиус

приложения усилия  $F_o$  к индентору (радиус обоймы, рис. 4);  $r_o$  – радиус отпечатка индентора на образце;  $N$  – нормальная нагрузка.

Размеры отпечатков индентора в образцах определялись: 1) по профилограммам, полученным с помощью компьютеризированной информационно-измерительной системы [2, 12] (рис. 5); 2) на микроскопе в 2-х взаимно перпендикулярных сечениях.

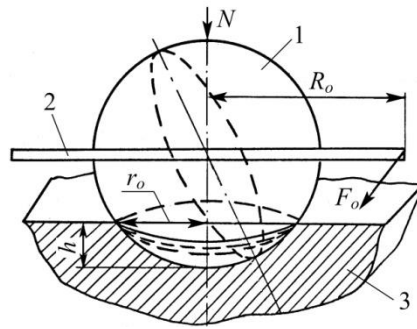


Рис. 4. Схема измерения молекулярной составляющей коэффициента трения:  
1 – индентор; 2 – образец;  
3 – дисковая обойма

Fig. 4. Scheme for finding the molecular component of the friction ratio  
1 – indenter; 2 – sample; 3 – disk holder

### Обзор результатов эксперимента

Исследовались пары «АСПК – Чугун СЧ20», «АСПК – Сталь 45», «ШХ15 – Чугун СЧ20», «ШХ15 – Сталь 45». Установлено, что микрочастицы материала образца на поверхности индентора отсутствовали. Также исследовалась пара «АСПК – медь». В этом случае на поверхности индентора оставалась плёнка цвета меди (рис. 5б), образование которой объясняется низкой прочностью меди и высокой прочностью адгезионной связи материалов исследуемой пары [13].

На рис. 6 показаны графики измене-

ния значений прочности адгезионной связи  $\tau_n$  и молекулярной составляющей  $f_m$  коэффициента трения в зоне обработки «индентор – чугун СЧ20». При АВ индентор (АСПК), как при наличии смазки, так и без неё оказывает более значимое влияние на исследуемые величины  $\tau_0$ ,  $\beta$ , по сравнению с методом НШ. В зоне контакта «индентор ШХ15 – СЧ20» значение  $\tau_0$  в 2,8...4,1 раза выше, чем в зоне контакта «индентор АСПК – СЧ20», а величина  $\beta$  больше, примерно, в 2 раза.

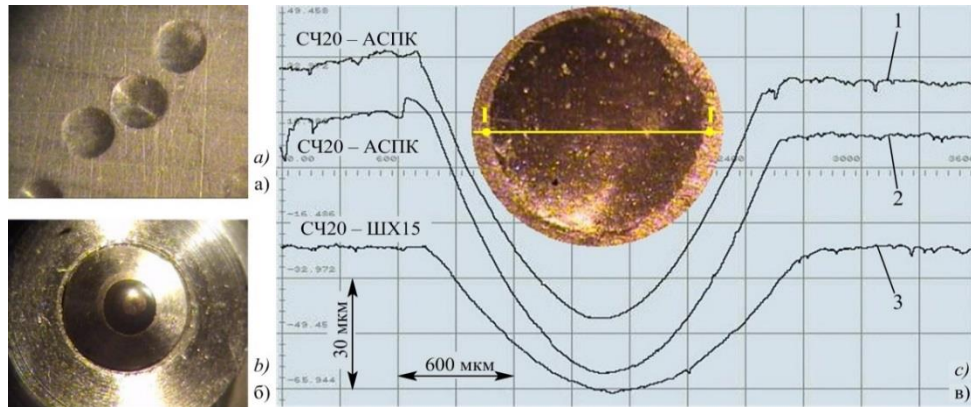


Рис. 5. Пример профилограмм отпечатков индентора для оценки прочности адгезионной связи и молекулярной составляющей коэффициента трения в парах «индентор (АСПК, ШХ15) – Чугун СЧ20»:  
а – общий вид отпечатков на поверхности образца; б – поверхность индентора после испытаний;  
в – профили отпечатков в сечении «I – I»

Fig. 5. An example of profile records of indenter prints for assessing the strength of the adhesive bond and the molecular component of friction ratio in pairs «indenter – Cast iron GG20»: a – general view of the indentation cups on the surface of the sample; b) indenter after testing; c) indentation profiles in sections «I – I»

Результаты исследований (рис. 7) показывают, что алмазное выглаживание плоских поверхностей деталей из стали 45

позволяет осуществлять обработку как при наличии смазки, так и без неё [13].

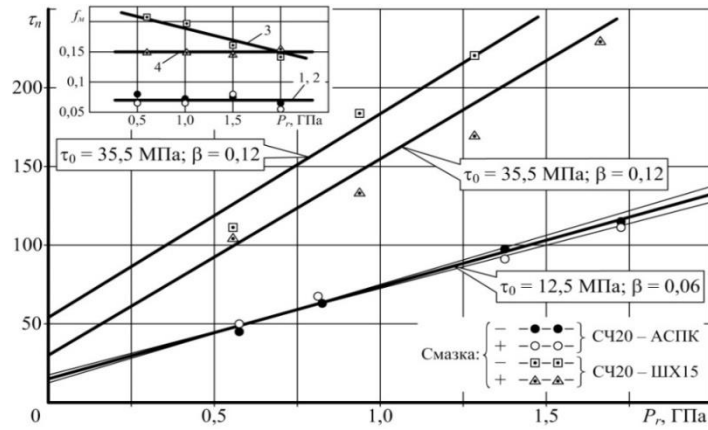


Рис. 6. Изменение значений прочности адгезионной связи  $\tau_n$  и молекулярной составляющей коэффициента трения  $f_m$  в зоне контакта инденторов АСПК (1, 2) и ШХ15 (3, 4) с поверхностями деталей из чугуна СЧ20 при наличии (1, 3) и отсутствии (2, 4) смазки

Fig. 6. The strength of the adhesive bond  $\tau_n$  and the molecular component of the coefficient of friction  $f_m$  at the contact of the surfaces of cast iron GG20 with the SPCD (1, 2) and SHX15 (ball bearing steel with chrome content 15%) (3, 4) indentors with (1, 3) and without (2, 4) lubrication

В случае исследования процессов контактного взаимодействия в паре «АСПК – медь» наблюдается высокая прочность адгезионной связи (рис. 7). Также, по аналогии с парой «индентор ШХ15 – СЧ20», наблюдается эффект повышения  $\tau_0$  при наличии смазки. При этом величина  $f_m$  снижается с ростом давления  $P_r$  в зоне контакта индентора с поверхностью.

Установлено, что введение смазки в зону контакта «индентор АСПК – СЧ20» незначительно влияет на изменение величин  $\tau_0$  и  $\beta$  (рис. 7). Это позволяет осуществлять алмазное выглаживание поверхностей деталей из чугуна без смазки.

Значения удельной сдвиговой прочности молекулярных связей  $\tau_0$  и пьезокоэффициента  $\beta$  (2) определялись по результатам экспериментов (рис. 6, 7) методом

наименьших квадратов по зависимостям [14]:

$$\tau_0 = \frac{\sum \tau_i \sum P_{ri}^2 - \sum (P_{ri} \tau_0) \sum P_{ri}}{n \sum P_{ri}^2 - (\sum P_{ri})^2} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{n \sum (P_{ri} \tau_i) - \sum P_{ri} \sum \tau_i}{n \sum P_{ri}^2 - (\sum P_{ri})^2} \quad (5)$$

Значения удельной сдвиговой прочности  $\tau_0$  и пьезокоэффициента  $\beta$  определялись по способу разгрузки, методика которого изложена в [9]. Максимальная нагрузка на индентор в начале эксперимента составляла 4,45 кН, затем она снижалась до значений 3,45 кН, 2,45 кН и 1,45 кН. При каждом снижении нагрузки определялись значения  $f_m$ ,  $\tau$  и  $\beta$ .

Результаты расчётов представлены в табл. 1 [13].

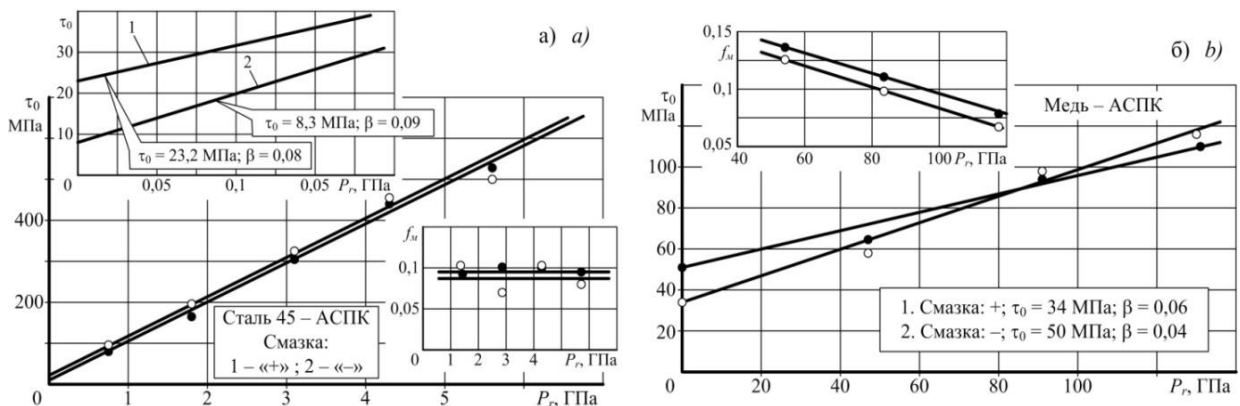


Рис. 7. Изменение значений прочности адгезионной связи  $\tau_0$  и молекулярной составляющей коэффициента трения  $f_m$  при наличии (1) и отсутствии (2) смазки в зоне контакта: а – «АСПК – сталь 45»; б – «АСПК – медь»

Fig. 7. The strength of the adhesive bond  $\tau_0$  and the molecular component of the friction ratio  $f_m$  when contacting surfaces of materials with (1) and without (2) lubrication: a – «SPCD – steel 45»; b – «SPCD – copper»

Значения молекулярной составляющей коэффициента трения  $f_m$ , удельной прочности адгезионной связи  $\tau_0$  и пьезокоэффициента  $\beta$  в зоне контакта «индентор – поверхность» при обработке алмазным выглаживанием (АСПК) и накатыванием шариками (ШХ15)

Table 1

*Analysis of the molecular component of the friction ratio  $f_m$ , the strength-density ratio of the adhesive bond  $\tau_0$  and pressure coefficient  $\beta$  in the contact «surface – indenter» during SPD process*

№	Материал индентора	Обрабатываемый материал	Смазка*	Величина $f_m$ при нагрузке на индентор $N$ , кН				$\tau_0$	$\beta$
				4,45	3,45	2,45	1,45		
1	АСПК	Сталь 45	+	0,088	0,1	0,072	0,097	23,2	0,08
			–	0,092	0,097	0,097	0,093	8,3	0,09
2	АСПК	Чугун СЧ20	+	0,065	0,065	0,08	0,045	15,3	0,06
			–	0,078	0,07	0,078	0,056	9,8	0,06
3	ШХ15	Чугун СЧ20	+	0,15	0,16	0,2	0,22	51,5	0,13
			–	0,15	0,15	0,14	0,15	35,5	0,12
4	АСПК	Медь	+	–	0,083	0,11	0,13	34,1	0,06
			–	–	0,07	0,1	0,13	50,5	0,04

\* (–, +) – отсутствие или наличие смазки соответственно

## Заключение

Результаты исследований прочности адгезионной связи и молекулярной составляющей коэффициента трения позволяют дать количественную оценку влияния материалов обрабатываемой поверхности и индентора, а также наличия смазки и величины нагрузки на индентор на удельную сдвиговую прочность молекулярных связей  $\tau_0$  и на пьезокоэффициент  $\beta$ , характеризующий изменение коэффициента трения при изменении нормального давления.

Полученные зависимости и табличные базы данных могут быть использованы в процессе технологической подготовки производства при определении требуемых силовых параметров процессов АВ или НШ, а также в ходе теоретических расчетов триботехнических характеристик поверхностей деталей из стали и чугуна после алмазного выглаживания или накатывания шариком.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей пластическим деформированием: справочник. Москва : Машиностроение, 1987. 328 с.
- Нагоркин М.Н., Федоров В.П., Нагоркина В.В., Ковалева Е.В. Параметрическая надёжность технологических систем лезвийной и упрочняющей обработки инструментами из синтетических сверхтвёрдых материалов по геометрическим параметрам качества и триботехническим характеристикам поверхностей деталей. *Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты, том VII : коллективная монография* ; под ред. А.В. Киричека. Москва : Спектр, 2016. С. 506–688. DOI 10.14489/4442-0118-3.
- Fyodorov V.P., Nagorkin M.N., Kheifetz M.L., Polsky E.A. Modeling of the contact interaction of the tool indenter with the part surface when processing by surface plastic deformation methods. *Materials Science Forum*, vol. 1037, 2021. Pp 564-570. DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.564.
- Федоров В.П. Технологическая устойчивость и параметры контактного взаимодействия индентора с поверхностью при финишной обработке поверхностным пластическим деформированием устройствами упругого действия. *Справочник. Инженерный журнал*. 2006. № 4. – С. 4-8.
- Федоров В.П., Кириллов О.Н., Нагоркин М.Н., Ковалева Е.В. Исследование параметров контактного взаимодействия индентора с поверхностью при обработке методами поверхностного пластического деформирования *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2020. Т. 16, № 3. С. 110-119. DOI 10.25987/VSTU.2020.16.3.015.
- Хворостухин Л.А., Шишкин С.В., Ковалёв А.П., Ишмаков Р.А. Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением. Москва : Машиностроение, 1988. 144 с. ISBN 5-217-00064-3.
- Нагоркин М.Н. Технологическое обеспечение шероховатости плоских поверхностей алмазным выглаживанием. *Обработка металлов (техно-*



- логия, оборудование, инструмент). 2002. № 3 (16). С. 17-24.
8. Торбило В.М. Алмазное выглаживание. – Москва : Машиностроение, 1972. 105 с.
  9. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей машин обработкой пластическим деформированием. *Справочник, Инженерный журнал*. 2003. № 8. С. 8-13.
  10. Нагоркин М.Н. Надежность технологического обеспечения шероховатости и износостойкости поверхностей деталей инструментами из синтетических сверхтвёрдых материалов: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Нагоркин Максим Николаевич; Брянский государственный технический ун-т. Брянск, 2019. 32 с.: ил. Библиогр.: с. 29–31. Место защиты: Брянский государственный технический ун-т. Текст: непосредственный.
  11. Михин Н.М. Внешнее трение твёрдых тел. Москва : Наука, 1977. 224 с.
  12. Суслов А.Г., Федоров В.П., Нагоркин М.Н., Пыриков И.Л. Комплексный подход к эксперимен-

1. Odintsov LG. Hardening and finishing of parts by plastic deformation: handbook. Moscow: Mashinostroenie; 1987.
2. Nagorkin MN, Fedorov VP, Nagorkina VV, Kovaleva EV. Parametric reliability of technological systems of blade and hardening machining with tools made of synthetic superhard materials according to geometric quality parameters and tribotechnical characteristics of the part surfaces. In: Kirichek AV, editor. *Progressive machine-building technologies, equipment and tools: monograph*. Moscow: Spectr; 2016. p. 506-688. DOI 10.14489/4442-0118-3.
3. Fyodorov VP, Nagorkin MN, Kheifetz ML, Polsky EA. Modeling of the contact interaction of the tool indenter with the part surface when processing by surface plastic deformation methods. *Materials Science Forum*. 2021; 1037:564-570. DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.564.
4. Fedorov VP. Technological stability and parameters of contact interaction of the indenter with the surface during finishing with surface plastic deformation devices of elastic action. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal*. 2006;4: 4-8.
5. Fedorov VP, Kirillov ON, Nagorkin MN, Kovaleva EV. Study of the parameters of the contact interaction of the indenter with the surface during processing by methods of surface plastic deformation. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2020;16(3):110-119. DOI 10.25987/VSTU.2020.16.3.015.
6. Khvorostukhin LA, Shishkin SV, Kovalev AP, Ishmakov RA. Increasing the load-bearing capacity of machine parts by surface hardening. Moscow: Mashinostroenie; 1988.

- тальным исследованиям технологических систем металлообработки по обеспечению параметров качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин. *Наукоёмкие технологии в машиностроении*. 2018. № 10. С. 3-13. DOI: 10.30987/article\_5bb4b1f9abbc54.46761484.
13. Ковалева Е.В. Технологическое обеспечение заданной закономерности изменения шероховатости плоских поверхностей деталей машин при отделочно-упрочняющей обработке поверхностным пластическим деформированием на станках с ЧПУ : специальность 05.02.08 «Технология машиностроения»: дис. на соискание ученой степени канд. технических наук / Ковалева Елена Владимировна; Брянский государственный технический ун-т. Брянск, 2007. 235 с. Библиогр.: с. 210-227.
  14. Суслов А.Г., Горленко О.А. Экспериментально-статистический метод обеспечения качества поверхности деталей машин: монография. Москва : Машиностроение-1, 2003. 303 с. ISBN 5-94275-041-6.

7. Nagorkin MN. Technological support of roughness of flat surfaces by diamond smoothing. *Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science*. 2002;3(16):17-24.
8. Torbilo VM. Diamond smoothing. Moscow: Mashinostroenie; 1972.
9. Suslov AG. Technological support and improvement of operational properties of machine parts by plastic deformation treatment. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal*. 2003;8:8-13.
10. Nagorkin MN. Reliability of technological support of roughness and wear resistance of part surfaces with tools made of synthetic superhard materials [abstract of the dissertation]. [Bryansk (RF)]: Bryansk State Technical University; 2019.
11. Mikhin NM. External friction of solids. Moscow: Nauka; 1977.
12. Suslov AG, Fedorov VP, Nagorkin MN, Pyrikov IL. An integrated approach to experimental studies of technological systems of metalworking to ensure quality parameters and operational properties of surfaces of machine parts. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2018;10:3-13. DOI: 10.30987/article\_5bb4b1f9abbc54.46761484.
13. Kovaleva EV. Technological support of a given pattern of changes in the roughness of flat surfaces of machine parts during finishing and hardening treatment by surface plastic deformation on CNC machines [dissertation]. [Bryansk (RF)]: Bryansk State Technical University; 2007.
14. Suslov AG, Gorlenko OA. Experimental and statistical method of ensuring the quality of the surface of machine parts: monograph. Moscow: Mashinostroenie-1; 2003.

## Сведения об авторах:

**Федоров Владимир Павлович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Брянского государственного технического университета, тел. 8-980-315-77-09, e-mail: fedorvlad44@mail.ru; Author-ID-РИНЦ: 694695.

**Fedorov Vladimir Pavlovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology at Bryansk State Technical University, phone: 8-980-315-77-09, e-mail: fedorvlad44@mail.ru; Author-ID-RSCI: 694695.

**Нагоркин Максим Николаевич**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Техносферная безопасность» Брянского государственного технического университета, тел. 8-960-552-61-25, e-mail: nagorkin@tu-bryansk.ru; Author-ID-РИНЦ: 391768.

**Nagorkin Maksim Nikolaevich**, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Technosphere Safety at Bryansk State Technical University, phone 8-960-552-61-25, e-mail: nagorkin@tu-bryansk.ru; Author-ID- RSCI: 391768.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**  
**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**  
**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.**  
**Article published in Open Access mode.**

Статья поступила в редакцию 18.03.2021; одобрена после рецензирования 04.03.2022; принята к публикации 21.03.2022. Рецензент – Соловьев Д.Л., доктор технических наук, профессор Муромского филиала (института) Владимирского государственного университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 18.03.2021; approved after review on 04.03.2022; accepted for publication on 21.03.2022. The reviewer is Solovyov D.L., Doctor of Technical Sciences, Professor of Murom Branch (Institute) of Vladimir State University, member of the Editorial Board of the journal *Transport Engineering*.