МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.891:621.785.5

О ФРИКЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ПОВЕРХНОСТИ ГАЗОЛАЗЕРНОГО РЕЗА БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ Р6М5

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, Л.Е. АФАНАСЬЕВА, канд. физ.-мат. наук,
М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: iz2v2@mail.ru

© Измайлов В.В., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В., 2022

Представлены результаты экспериментального исследования статического коэффициента трения образцов быстрорежущей стали Р6М5 после газолазерной резки, упрочненных по стандартной технологии. На основании трактовки законов трения Амонтона и Кулона как уравнений линейной регрессии силы трения на силу нормального давления соответствующей статистической обработкой результатов экспериментов получены значения коэффициентов трения образцов в контакте со сферическими инденторами из различных материалов: циркония, сплава ЗлМ800, корунда. Экспериментально измерены величины удельной силы трения (сдвиговой прочности фрикционного контакта). Показано, что удельная сила трения в весьма незначительной степени зависит от нормального контактного давления (среднего нормального напряжения в контакте). Величина удельной силы трения в контакте стали Р6М5 с корундовым индентором в несколько раз больше, чем в контакте с металлическими инденторами.

Ключевые слова: быстрорежущая сталь, газолазерная резка, коэффициент трения, удельная сила трения, законы трения Амонтона – Кулона, линейная регрессия.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-1-5-13

ВВЕДЕНИЕ

Технологии обработки металлических поверхностей, основанные на воздействии концентрированных потоков энергии, в настоящее время успешно конкурируют с технологиями, в основе которых лежит механическое воздействие инструмента на обрабатываемую поверхность. В частности, для обработки технических поверхностей успешно применяется лазерное излучение. Воздействие энергии лазерного излучения позволяет не только формировать заданную конфигурацию и размеры детали (например, лазерная резка), но и изменять структуру и механические свойства поверхностных слоев (например, лазерная закалка). В результате обработки поверхность детали должна приобрести определенные эксплуатационные свойства. К ним относятся в числе прочих и триботехнические свойства. В статье [1] эти свойства поверхности образцов быстрорежущей стали марки Р6М5, полученных с помощью одной из разновидностей лазерных технологий – газолазерной резки (ГЛР), оценивали по величине коэффициента трения. Эта величина определялась в соответствии с ГОСТ 27674-88 как отношение силы трения T к силе нормального давления N в контакте образцов из исследуемых материалов: $f = T/N$. Хорошо известно [2–4], что

величина рассчитанного таким образом коэффициента трения не является постоянной для данной пары трения и зависит от нормальной нагрузки. В этой зависимости заключается существенный недостаток: определенный таким способом коэффициент трения как фрикционная характеристика материала пары трения выступает не только функцией материала, но и внешнего параметра (силы нормального давления).

Цель данной работы – определить фрикционные характеристики поверхности на примере образцов быстрорежущей стали Р6М5 после лазерного воздействия.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Одной из первых закономерностей трения, установленной еще Леонардо да Винчи, была пропорциональность силы трения T силе нормального давления N. В современном выражении это известный закон Амонтона:

$$T = f_A N\,, \tag{1}$$

где коэффициент пропорциональности f_A будем называть коэффициентом трения по Амонтону. Позднее Ш. Кулон обобщил закон Амонтона, добавив в формулу (1) постоянное слагаемое T_0:

$$T = T_0 + f_C N\,, \tag{2}$$

где коэффициент пропорциональности f_C будем называть коэффициентом трения по Кулону [2].

Поскольку уравнения (1) и (2) по сути эмпирические, логично рассматривать их как уравнения регрессии, где зависимой переменной (откликом) является сила трения T, а независимой (предиктором) – сила нормального давления N. Входящие в уравнения (1) и (2) коэффициенты трения по определению являются постоянными (не зависящими от нагрузки N) и могут быть рассчитаны, например, методом наименьших квадратов, как и величина T_0. В этом случае они могут рассматриваться как функции состава, структуры и состояния приповерхностных слоев материала компонентов пары трения. Именно такой подход использован в данной работе.

Коэффициент трения как фрикционную характеристику материала пары трения удобно использовать в прикладных задачах и нормативно-справочных документах. Для теоретического анализа процессов фрикционного взаимодействия более информативна другая характеристика пары трения – удельная сила трения $\tau = T/A_r$, где A_r – фактическая площадь контакта. По физическому смыслу τ – это не что иное, как сдвиговая прочность (критическое напряжение сдвига) фрикционного контакта. В описываемых экспериментах фактическая площадь контакта сферической вершины индентора с радиусом кривизны r и плоской поверхности стального образца может быть рассчитана по формуле $A_r = \pi a^2$, где a – радиус площадки контакта. В условиях упругого контакта индентора с плоским образцом радиус площадки контакта можно рассчитать по известной формуле Герца:

$$a = \left(\frac{3}{4}\cdot\frac{Nr}{E^*}\right)^{\frac{1}{3}}, \tag{3}$$

где E^* – эквивалентный модуль Юнга ($E^* = \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}\right)^{-1}$, где E_1 и E_2 – модули Юнга материалов контактной пары; μ_1 и μ_2 – соответствующие коэффициенты Пуассона).

Величина удельной силы трения в общем случае зависит от нормального напряжения в контакте. Как правило, зависимость носит линейный характер [4]:

$$\tau = \tau_0 + \beta p_r\,, \tag{4}$$

где $p_r = \frac{N}{A_r} = \frac{N}{\pi a^2}$ – фактическое давление (среднее нормальное напряжение) на площадке контакта индентора с плоским образцом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования служили образцы быстрорежущей стали марки Р6М5 после ГЛР, предварительно упрочненные по стандартной технологии, включающей закалку и трехкратный отпуск при температуре 560 °С. Для сравнительных испытаний использовали поверхность образцов, не подвергавшуюся лазерному воздействию. После упрочнения по стандартной технологии сталь приобрела структуру: мартенсит, карбиды и 2…3 % остаточного аустенита. После ГЛР поверхность реза оплавляется и закаливается повторно. В области лазерного воздействия можно выделить зоны закалки из жидкой и твердой фазы. Микроструктура в этих зонах отличается повышенным содержанием аустенита [1].

Исследуемые поверхности образцов стали Р6М5 подвергали механической шлифовке и полировке до зеркального блеска на алмазных пастах различной зернистости.

Коэффициенты трения f_A, f_C и параметр T_0 измеряли на поверхности образца после закалки и трехкратного отпуска (ЗО) и в двух зонах поверхности газолазерного реза: в зоне закалки из жидкой фазы (ЗЖФ) и твердой (ЗТФ).

Триботехнические характеристики исследуемых образцов определяли с помощью прибора для измерения коэффициента трения покоя поверхностных слоев материала [5]. Исследуемая пара трения состояла из плоского образца стали Р6М5 и сферического индентора из немагнитных материалов: циркония Zr; сплава ЗлМ800 (80 % Au, 20 % Cu); оксида алюминия Al_2O_3 (корунда). Немагнитные материалы инденторов выбраны с целью исключить влияние на результаты экспериментов намагниченности стальных образцов, связанной с их предысторией. Кроме того, использованные материалы инденторов устойчивы к воздействию окружающей атмосферы, их поверхности на воздухе покрыты лишь тонкими адсорбированными пленками. Это обстоятельство способствует воспроизводимости результатов эксперимента.

Для металлических инденторов радиус закругления r = 0,5 мм, для корундового индентора r = 0,05 мм. Нормальная нагрузка N на контакт задавалась разновесами и изменялась в диапазоне 0,49…5,88 мН. В указанном диапазоне нормальных нагрузок размеры площадок контакта сферических инденторов с плоскими образцами составляли порядка 0,5…5 мкм. Расчет диаметров площадок контакта выполнен на основании теории Г. Герца для контакта упругих тел с поверхностями второго порядка кривизны (см. формулу (3)). Фактическое контактное давление (в зависимости от приложенной нормальной нагрузки) изменялось в диапазоне примерно 70…180 МПа для металлических пар трения и 600…1 500 МПа для пары трения «сталь – корунд».

В экспериментах измеряли величины статической силы трения и статического коэффициента трения. Именно параметры статической силы трения в наибольшей степени характеризуют прочность молекулярных связей, возникающих между контактирующими поверхностями и являющихся одной из причин сопротивления относительному тангенциальному смещению поверхностей.

Малые размеры площадки контакта позволяют выявить влияние неоднородности структуры поверхности на ее триботехнические характеристики.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимости силы трения от силы нормального давления в контакте инденторов с плоской стальной поверхностью представлены на рис. 1. Все зависимости характеризуются очень высоким значением коэффициента корреляции (не менее 0,98).

Параметры T_0, f_C и f_A, входящие в уравнения (1)–(3) и полученные методом наименьших квадратов на основании экспериментальных зависимостей (рис. 1), сведены в табл. 1. Все коэффициенты статистически значимы на уровне значимости p = 0,05. Наглядное представление о соотношении фрикционных параметров, соответствующих различным парам трения и условиям термообработки, дает рис. 2.

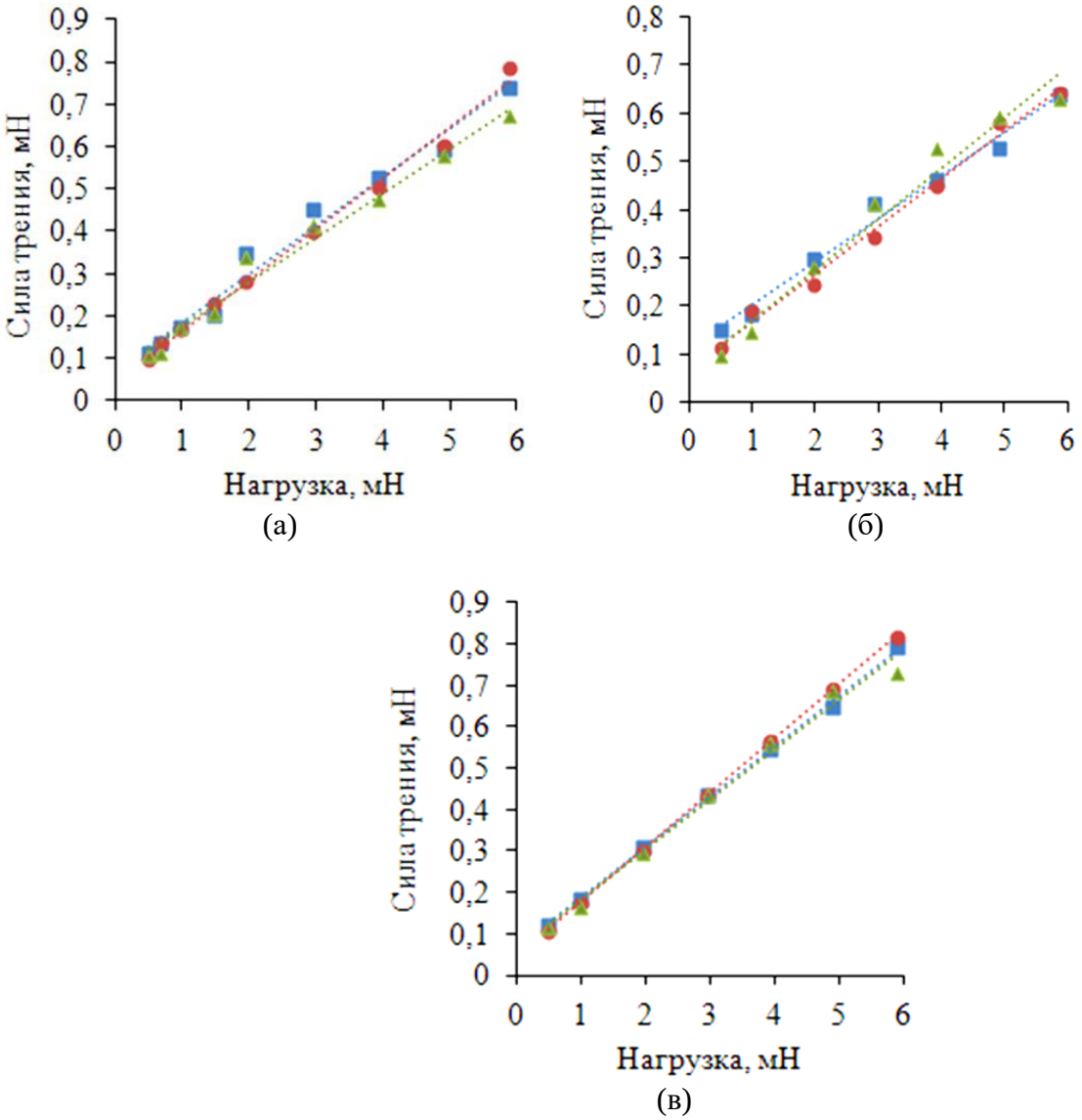

Рис. 1. Зависимость силы трения от нормальной нагрузки:
циркониевый индентор (а); золотой индентор (б); корундовый индентор (в).
Поверхности, прошедшие различную термообработку:
■ – ЗО + ЗЖФ; ●, ▲ – ЗО + ЗТФ

Таблица 1. Параметры уравнений законов Амонтона и Кулона

Материал индентора	Обработка	Параметры		
		по Кулону		по Амонтону
		T_0, мН	f_C	f_A
Zr	ЗО + ЗЖФ	0,069±0,020	0,114±0,006	0,132±0,006
	ЗО + ЗТФ	0,047±0,011	0,120±0,004	0,132±0,004
		0,072±0,018	0, 10 ±0,006	0,123±0,006
	ЗО	0,049±0,018	0,086±0,005	0,098±0,004
ЗлМ800	ЗО + ЗЖФ	0,114±0,016	0,089±0,004	0,116±0,007
	ЗО + ЗТФ	0,070±0,015	0,098±0,004	0,115±0,005
		0,067±0,028	0,105±0,008	0,121±0,006
	ЗО	0,130±0,028	0,108±0,008	0,139±0,009
Al_2O_3	ЗО + ЗЖФ	0,065±0,007	0,122±0,002	0,138±0,004
	ЗО + ЗТФ	0,045±0,002	0,132±0,006	0,143±0,003
		0,065±0,021	0,120±0,006	0,136±0,005
	ЗО	0,064±0,014	0,117±0,004	0,133±0,004

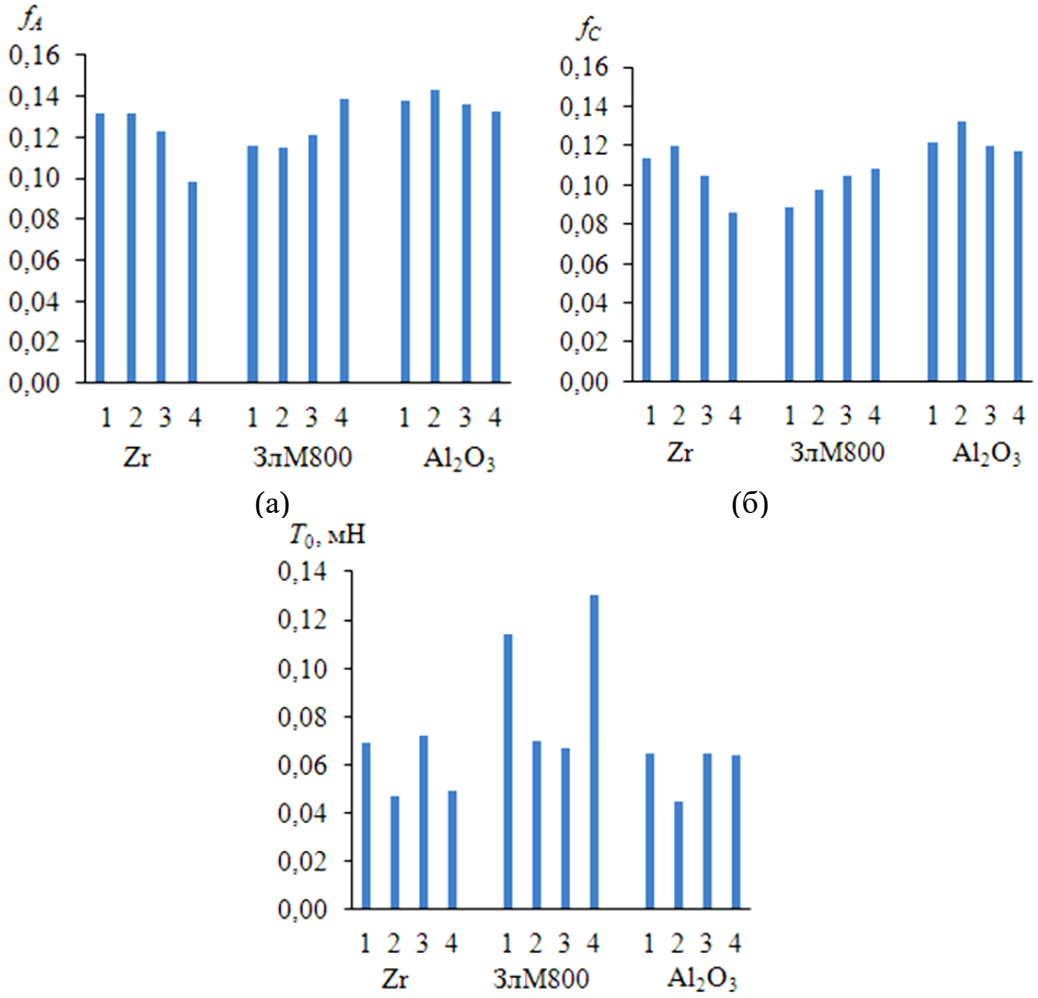

Рис. 2. Значения параметров в уравнениях законов Амонтона и Кулона: коэффициент трения по Амонтону (а), по Кулону (б); сила трения T_0 (в); 1 – ЗО + ЗЖФ; 2 и 3 – ЗО + ЗТФ; 4 – ЗО

Как и следовало ожидать, значения коэффициентов трения по Амонтону f_A несколько превышают соответствующие значения коэффициентов трения по Кулону f_C. Это превышение связано исключительно со способом обработки экспериментальных данных в соответствии с формулами (1) и (2) и не имеет под собой какой-либо физической подоплеки.

Величины коэффициента трения по Амонтону f_A согласуются с величинами коэффициента трения по ГОСТ 27674-88 при относительно больших нагрузках [1].

Неоднородность структуры поверхностного слоя материала контактирующих тел [6] приводит к различию величин T_0, f_C и f_A при одинаковой технологии упрочняющей обработки поверхности (см. рис. 2 при ЗО + ЗТФ), однако во многих случаях это различие находится в пределах погрешности эксперимента.

Какого-либо закономерного влияния на величину параметров T_0, f_C и f_A технологии упрочняющей обработки поверхности стальных образцов в описываемых экспериментах не выявлено.

Значения удельной силы трения в зависимости от нормального контактного давления для исследованных пар представлены на рис. 3. Параметры линейной аппроксимации зависимостей (4) приведены в табл. 2.

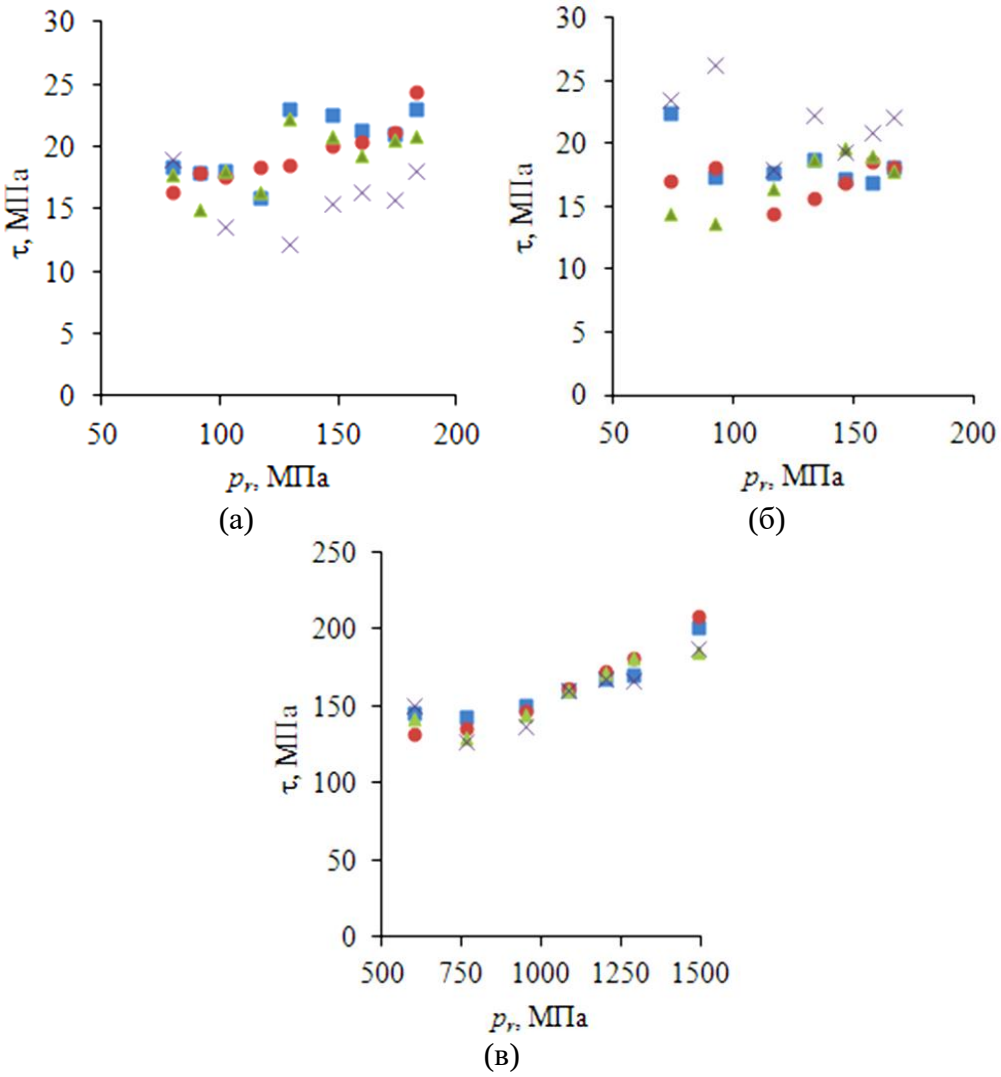

Рис. 3. Зависимости удельной силы трения от нормального давления: циркониевый индентор (а); золотой индентор (б); корундовый индентор (в); ■ – ЗО + ЗЖФ; ●, ▲ – ЗО + ЗТФ; × – ЗО

Таблица 2. Параметры линейной аппроксимации зависимости удельной силы трения от нормального контактного давления

Материал индентора	Обработка	τ_0, МПа	β
Zr	ЗО + ЗЖФ	13,5±2,5	0,05±0,02
	ЗО + ЗТФ	11,4±1,2	0,06±0,01
		13,2±2,4	0,04±0,02
	ЗО	15,2±4,0	0
ЗлМ800	ЗО + ЗЖФ	22,8±2,5	0
	ЗО + ЗТФ	15,7±2,5	0
		9,8±2,0	0,05±0,01
	ЗО	26,4±4,1	0
Al_2O_3	ЗО + ЗЖФ	100±17	0,06±0,01
	ЗО + ЗТФ	71±9	0,09±0,01
		92±12	0,06±0,01
	ЗО	100±18	0,05±0,02

Как видно из рис. 3, удельная сила трения слабо зависит от нормального контактного давления, что подтверждается малыми значениями коэффициента β в табл. 2. Запись β = 0 в табл. 2 означает, что величины данного параметра, полученные в результате обработки экспериментальных данных по методу наименьших квадратов, статистически незначимы. Иными словами, отсутствует статистически значимая связь между нормальным контактным давлением и удельной силой трения, так что последнюю можно считать величиной постоянной.

Величины τ_0, приведенные в табл. 2, в пределах погрешности эксперимента совпадают с аналогичными, полученными в статье [1] с помощью несколько отличающейся методики обработки экспериментальных данных. Значения параметра β в статье [1] не приводятся. Обращают на себя внимание относительно большие значения параметра τ_0 для пары трения «сталь Р6М5 – корундовый индентор». Они в несколько раз превосходят соответствующие величины для металлических инденторов (Zr и сплав ЗлМ800). Этот результат также согласуется с результатами статьи [1].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные эксперименты по измерению силы статического трения в контакте образцов из стали Р6М5 после ГЛР и стандартной технологии термической обработки с образцами из различных материалов показали, что между силой трения и силой нормального давления существует весьма сильная линейная корреляция. Коэффициенты, входящие в формулы, описывающие эту корреляцию (см. уравнения (1) и (2)), не зависят от нормальной нагрузки на контакт. Это дает основания использовать коэффициенты трения, входящие в законы трения Амонтона и Кулона, в качестве фрикционных характеристик материалов пары трения с учетом характерных особенностей их состава, структуры и состояния поверхностных слоев.

Удельная сила трения (сдвиговая прочность фрикционного контакта) также не зависит или весьма слабо зависит от нормального контактного давления (среднего нормального напряжения в контакте).

Закономерного влияния механизма термического воздействия на фрикционные характеристики стали Р6М5 проведенные эксперименты не показали (по крайней мере в условиях преобладания адгезионной природы силы трения). В то же время лазерное

воздействие существенно повышает износостойкость поверхности образцов из стали Р6М5 по сравнению со стандартной технологией термообработки (ЗО). Так, линейная интенсивность изнашивания поверхности снижается в 2,6 раза, скорость изнашивания – в 3 раза [7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Зубков Н.С., Новоселова М.В., Афанасьева Л.Е. Экспериментальное исследование фрикционных свойств быстрорежущей стали // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвузовский сборник научных трудов.* 2011. № 4. С. 134–139.
2. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Фрикционные характеристики металлических пар трения и законы трения Амонтона и Кулона // *Трение и износ*. 2019. Т. 40. № 5. С. 473–478.
3. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. М.: Физматлит. 2013. 352 с.
4. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / под ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение. 2001. 664 с.
5. Патент РФ 2150688. *Способ определения коэффициента трения покоя поверхностных слоев материала* / Измайлов В.В., Гусев А.Ф., Нестерова И.Н., Иванова А.А.; Заявл. 25.12.1998. Опубл. 10.06.2000. Бюл. № 16.
6. Барчуков Д.А., Цыгвинцев А.В., Афанасьева Л.Е. Особенности формирования структуры и свойств быстрорежущей стали при импульсно-дуговой наплавке // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 4 (4). С. 16–22.
7. Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В., Барабонова И.А. Триботехнические свойства быстрорежущей стали после газолазерной резки и обработки холодом // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2015. № 8. С. 105–110.

Для цитирования: Измайлов В.В., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В. О фрикционных характеристиках поверхности газолазерного реза быстрорежущей стали Р6М5 // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2022. № 1 (13). С. 5–13.

ON THE FRICTIONAL CHARACTERISTICS OF THE SURFACE OF THE GAS-LASER CUT OF HIGH-SPEED STEEL R6M5

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., L.E. AFANASIEVA, Cand. Sc.,
M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: iz2v2@mail.ru

The results of the experimental study of the static friction coefficient of high-speed steel R6M5 samples after gas-laser cutting and hardened according to the standard technology are presented. Based on the interpretation of the Amontons and Coulomb laws of friction as equations of linear regression of the friction force on the normal pressure force, the values of the friction coefficients of the steel samples in contact with spherical indeters made of various materials: zirconium, ZlM800 copper-gold alloy and corundum were obtained by statistical

processing of the experimental results. The values of the specific friction force (shear strength of the frictional contact) have been experimentally measured. It is shown that the specific friction force depends very little on the normal contact pressure (average normal stress in the contact). The value of the specific friction force in the contact of R6M5 steel with a corundum indenter is several times greater than that in contact with metal indenters.

Keywords: high-speed steel, gas laser cutting, friction coefficient, specific friction force, Amontons – Coulomb friction laws, linear regression.

REFERENCES

1. Zubkov N.S., Novoselova M.V., Afanasyeva L.E. Experimental study of the frictional properties of high-speed steel. *Mekhanika i fizika protsessov na poverkhnosti i v kontakte tverdykh tel, detaley tekhnologicheskogo i energeticheskogo oborudovaniya: mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov.* 2011. No. 4, pp. 134–139. (In Russian).

2. Izmailov V.V., Novoselova M.V. Friction characteristics of metal friction pairs and the laws of friction of Amonton and Coulomb. *Treniye i iznos.* 2019. V. 40. No. 5, pp. 473–478. (In Russian).

3. Popov V.L. Mekhanika kontaktnogo vzaimodeystviya i fizika treniya. Ot nanotribologii do dinamiki zemletryaseniy [Contact mechanics and physics of friction. From nanotribology to earthquake dynamics]. Moscow: Fizmatlit. 2013. 352 p.

4. Osnovy tribologii (treniye, iznos, smazka) [Fundamentals of tribology (friction, wear, lubrication)]. Ed. A.V. Chichinadze. Moscow: Mashinostroenie. 2001. 664 p.

5. Patent RF 2150688. *Sposob opredeleniya koeffitsiyenta treniya pokoya poverkhnostnykh sloyev materiala* [Method of determining the coefficient of friction at rest of the surface layers of the material]. Izmailov V.V., Gusev A.F., Nesterova I.N., Ivanova A.A. Declared 25.12.1998. Published 10.06.2000. Bulletin No. 16.

6. Barchukov D.A., Tsygvintsev A.V., Afanasieva L.E. Features of the formation of the structure and properties of high-speed steel during pulse-arc surfacing. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki».* 2019. No. 4 (4), pp. 16–22. (In Russian).

7. Afanasieva L.E., Novoselova M.V., Barabonova I.A. Tribotechnical properties of high-speed steel after gas-laser cutting and cold treatment. *Mekhanika i fizika protsessov na poverkhnosti i v kontakte tverdykh tel, detaley tekhnologicheskogo i energeticheskogo oborudovaniya: mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov.* 2015. No. 8, pp. 105–110. (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 07.11.2021; после рецензирования/revised: 10.12.2021; принята/accepted: 20.12.2021