

Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2022. №2 (128). С. 26-31.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №2 (128). P. 26-31.

Научная статья
УДК 621.9.011
doi:10.30987/2223-4608-2022-2-26-31

Повышение коррозионной стойкости шлифованных деталей рациональным применением энергии ультразвукового поля

Евгений Степанович Киселев¹, д.т.н.,
Николай Владимирович Мезин², аспирант,
Никита Сергеевич Штубов³, студент
^{1,2,3} Ульяновский государственный технический университет», г. Ульяновск, РФ,
¹ kec.ulstu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1745-9016>,
² macbet@list.ru,
³ shtubov99@mail.ru

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния условий обработки на коррозионную стойкость шлифованных деталей из нержавеющей хромоникелевой стали аустенитного класса 12X18H9T2. Установлено, что введение в зону формообразования энергии ультразвукового поля в процессе шлифования позволяет повысить коррозионную стойкость деталей на 12...15% в зависимости от режима шлифования.

Ключевые слова: производительность, ультразвук, коррозия, остаточные напряжения, микротвердость, шероховатость

Для цитирования: Киселев Е.С., Мезин Н.В., Штубов Н.С. Повышение коррозионной стойкости шлифованных деталей рациональным применением энергии ультразвукового поля // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №2 (128). – С. 26-31. doi:10.30987/2223-4608-2022-2-26-31.

Original article

Improving the corrosion resistance of ground parts by smart use of ultrasonic field energy

Evgeny S. Kiselyov¹, Dr. Sn. Tech.,
Nikolay V. Mezin², Post graduate student,
Nikita S. Shtabov³, student
^{1,2,3} Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russian Federation
¹ kec.ulstu@mail.ru, ² macbet@list.ru, ³ shtubov99@mail.ru

Annotation. The results of experimental studies of the effect of processing conditions on the corrosion resistance of ground parts made of stainless chromium-nickel steel of austenitic class 12X18H9T2 are quoted. It is found that the introduction of ultrasonic field energy into the zone of generation of geometry during grinding makes it possible to increase the corrosion resistance of parts by 12...15% depending on the grinding mode.

Keywords: performance, ultrasound, corrosion, residual stresses, microhardness, roughness

For citation: Kiselev E.S., Myazin N.V., Stubov N.S. Improving the corrosion resistance of ground parts by smart use of ultrasonic field energy / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, No.2 (128), pp. 26-31. doi:10.30987/2223-4608-2022-2-26-31.

Экономические потери от коррозии в промышленно развитых странах достигли размеров, сравнимых с вложениями в развитие крупных отраслей производства и даже превосходящих их. По статистическим данным, безвозвратные потери составляют 8...12 % от первоначальной массы металла, что эквивалентно 3,5 % валового национального продукта. Общеизвестно, что 40...50 % машин и сооружений работают в агрессивных средах, 30 % – в слабо агрессивных и только 10 % не требуется активная антикоррозионная защита [1, 2].

Детали машин, приборов и механизмов в реальных условиях эксплуатации работают в различных средах (влажный воздух; вода и водные растворы; смазочные масла; кислоты; щелочи и др. среды), при различных температурах и давлениях. В этих условиях разрушение деталей может происходить без их взаимного контактирования. Долговечность таких деталей определяется их коррозионной стойкостью, т.е. способностью металла сопротивляться действиям химических и электрохимических процессов. Кроме того, находясь в таких условиях, ряд деталей может испытывать и действие знакопеременных нагрузок. Долговечность таких деталей определяется коррозионно-усталостной прочностью.

Скорость коррозии детали зависит от множества одновременно действующих факторов, среди которых как внутренние (химический состав металла; тип структуры; технологические остаточные напряжения (ТОН) поверхностного слоя (ПС); высотные параметры шероховатости поверхности после обработки), так и внешние, характеризующие состав агрессивной среды и условия протекания процесса (давление; температура; гидродинамические условия и др.).

Легирование нержавеющей (коррозионно-стойких) сталей титаном и ниобием с одновременным уменьшением процентного содержания углерода и рациональным выбором температурного интервала закалки практически исчерпали ресурсы повышения межкристаллитной коррозии (МКК) – особого, очень опасного вида коррозионного разрушения металла по границам аустенитных зерен, когда электрохимический потенциал их пограничных участков понижается вследствие обеднения хромом.

Коррозионное разрушение деталей, как правило, начинается с поверхности. Поверхность металла, имея характерный для данного вида обработки рельеф, несет на себе большое количество дефектов в виде царапин, трещин, надразов, сдвигов и т.д. Возле этих мест

обычно начинается развитие коррозионных процессов и разрушение [2 – 4].

На современном этапе развития науки в числе основных мер борьбы с межкристаллитной коррозией сталей находится формирование в ПС сжимающих ТОН. Остаточные напряжения сжатия способствуют замедлению коррозионных процессов. Однако чаще всего заключительные операции изготовления стальных деталей осуществляются шлифованием или высокоскоростной лезвийной обработкой. Обеспечивая малые высотные параметры шероховатости, способствующие повышению коррозионной стойкости, одновременно из-за высокой контактной температуры резания в ПС формируются растягивающие ТОН, обеспечивающие существенное снижение антикоррозионных свойств изготавливаемых деталей.

Таким образом, основным методом повышения коррозионной стойкости нержавеющей сталей в настоящее время является рациональный выбор финишной операции, обеспечивающей, наряду с малыми высотными параметрами шероховатости, наличие в поверхностном слое сжимающих, или минимальный уровень растягивающих ТОН.

Наиболее подходящей операцией для этой цели является поверхностно-пластическое деформирование. Однако в силу известных причин, этот метод обработки является не столь универсальным по сравнению с традиционными методами лезвийной и абразивной обработки. Поэтому, как следует из анализа научно-технической литературы [2 – 4] и результатов собственных исследований [5 – 8], с целью формирования в детали после обработки ПС, обладающего наиболее высокой коррозионной стойкости, необходимо выбрать такой инструмент и режим обработки, при котором будет обеспечен наименее теплонапряженный сьем припуска.

Очевидно, что для окончательных (финишных) операций шлифования заготовок из нержавеющей сталей наиболее эффективным будет использование абразивных кругов из кубического нитрида бора (например, из эльбора), а также ввод в зону контактного взаимодействия при полустативном шлифовании энергии ультразвукового (УЗ) поля. В последнем случае существенно сокращаются затраты на трение.

Кроме того, УЗ колебания способствуют релаксации возникающих термических и структурно-фазовых (как правило – растягивающих) технологических остаточных напряжений [5, 8]. Учитывая, что теплосиловая напряженность в существенной степени опреде-

ляется элементами режима шлифования, была поставлена задача прямыми многофакторными экспериментами (табл. 1) установить влияние каждого из них, а также УЗ колебаний, на коррозионную стойкость плоских поверхностей деталей из аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

1. Параметры режимов резания при многофакторных экспериментальных исследованиях

Контролируемые параметры	$V_{ст}$, м/мин	S_r , мм/ход стола	t , мм
	X1	X2	X3
Верхний уровень (+)	12	0,02	0,2
Нижний уровень (-)	8	0,01	0,1
Основной уровень	10	0,015	0,15
Интервал варьирования	2	0,005	0,05

Шлифование заготовок осуществляли абразивным кругом 1 200 20 3225 AF60 L7V352 на плоскошлифовальном станке 3Д710В-1с применением 10 %-ной полусинтетической водной СОЖ Cimstar 620. При экспериментах использовалась ультразвуковая аппаратура, описанная в работах [7, 8].

Силы резания и крутящий момент измерялись на динамометре УДМ-100, оборудованном тензодатчиками Kuowa kfg-5-120-c1-11. Динамометр закреплялся на столе экспериментальной установки. При измерении составляющих силы резания электрический сигнал с тензорезисторов УДМ-100 подавался на модуль LTR212 в составе крейта LTR-EU-2. Ранее была проведена его статическая калибровка и откалиброван динамометр в целом.

В ходе многофакторных экспериментальных исследований с помощью потенциостат-гальваностата Р20Х осуществляли оценку межкристаллитной коррозии с помощью коэффициента K (по отношению заряда активации к заряду активации). Учитывая, что коррозионная стойкость обработанных со съемом припусков поверхностей зависит от ряда параметров качества поверхностного слоя, в процессе исследований использовали профилометр-профилограф мод. 130 (оценка параметров шероховатости), микротвердомер Tukon 1102/12/02 фирмы Wilson Hardness (для оценки степени наклепа).

Кроме того, измеряли технологические остаточные напряжения I и II рода соответственно с помощью аппаратуры неразрушающего контроля остаточных напряжений в металлах и сплавах СИТОН «АРМ» и рентгеновского измерительного комплекса «РИКОР-4». Рентгеновский измерительный комплекс

«РИКОР-7» использовали для оценки структурно-фазовых превращений в поверхностном слое также неразрушающим методом.

Как следует из анализа экспериментальных исследований, во всех случаях в поверхностном слое шлифованных заготовок после обработки формируются растягивающие ТОН, что объясняется высокой тепловой напряженностью самого процесса съема припуска абразивным кругом. Введение в зону шлифования энергии УЗ поля уменьшает затраты на трение абразивных зерен, а, следовательно, снижает теплосиловую напряженность процесса формообразования новых поверхностей.

Результатом этого было уменьшение величины и глубины залегания растягивающих технологических остаточных напряжений на 15...20 % (в ряде экспериментов величина ТОН была близкой к нулю), что было зафиксировано с использованием аппаратуры СИТОН «АРМ».

Некоторые другие результаты экспериментов представлены в табл. 2 и на рис. 1 – 7 в виде графиков.

Результаты данных исследований подтверждают сделанные предположения: введение в зону формообразования при шлифовании плоских поверхностей энергии УЗ поля является эффективным средством повышения коррозионной стойкости деталей машин из аустенитных нержавеющей сталей. Коррозионная стойкость увеличивается до 2 – 4 раз в зависимости от элементов режима шлифования.

Следует отметить, что, несмотря на увеличение режущей способности абразивного круга с введением УЗ энергии в контактные зоны при шлифовании и естественным уменьшением высотных параметров шероховатости, коррозионная стойкость шлифованных образцов несколько увеличивается.

Как показывает анализ многофакторных экспериментальных исследований, наибольшее влияние оказывает введение УЗ колебаний при изменении поперечной подачи на двойной ход. Исследования показали, что с введением УЗ колебаний поверхностное увеличение твердости (наклеп) уменьшается, что увеличивает коррозионную стойкость и, вероятно, уменьшает коррозионно-усталостную прочность.

Измерения величины и глубины залегания растягивающих технологических остаточных напряжений I и II рода показали уменьшение их величин.

При обработке с использованием УЗ колебаний, шероховатость поверхности улучшается (снижается параметр шероховатости R_z – высота неровностей профиля по десяти точкам). Это объясняется тем, что за счет ультра-

звуковых колебаний увеличивается число зерен, диспергирующих (измельчающих)

материал заготовки.

2. Уравнения регрессии для определения составляющих сил шлифования и параметров качества поверхностного слоя

Параметр	Уравнение регрессии при обычном шлифовании		Уравнение регрессии для шлифования с ультразвуковыми колебаниями	
	В кодовой форме	В натуральной форме	В кодовой форме	В натуральной форме
P_z	$3,38+0,21X_1+0,09X_2+0,05X_3+0,05X_1X_2+0,04X_1X_3+0,02X_2X_3+0,01X_1X_2X_3$	$13,02+0,01v-14S_r-1,10t+2,25vS_r+0,12vt-140S_r t+20vS_r t$	$2,84+0,08X_1+0,09X_2+0,05X_3+0,03X_1X_2-0,03X_1X_3+0,03X_2X_3-0,01X_1X_2X_3$	$2,02+0,08v-7S_r-0,80t+0,01vS_r-0,03vt+290S_r t-17,50vS_r t$
P_y	$4,82+0,16X_1+0,39X_2+0,34X_3+0,06X_1X_2+0,06X_1X_3+0,04X_2X_3+0,04X_1X_2X_3$	$1,47+0,08v+162S_r+15,30t-6,25vS_r+0,63vt+970S_r t+82,50vS_r t$	$2,50+0,15X_1+0,40X_2+0,25X_3+0,04X_1X_2-0,06X_1X_3-0,10X_2X_3-0,03X_1X_2X_3$	$0,18-0,06v-1,67S_r+6,73t+14,33vS_r+0,46vt+266,67S_r t+68,33vS_r t$
HV	$158,37+3,32X_1+1,39X_2+1,02X_3+0,96X_1X_2+0,88X_1X_3-0,21X_2X_3+0,94X_1X_2X_3$	$117,90+3,13v+2274S_r+227,40t-187vS_r-19,45vt-197,10S_r t+1887,50vS_r t$	$151,68-2,65X_1-1,08X_2+0,01X_3+0,81X_1X_2+0,32X_1X_3-0,48X_2X_3+1,09X_1X_2X_3$	$150,90+0,12v+632,93S_r+134,09t-71,12vS_r-12,02vt-4759,33S_r t+433,67vS_r t$
R_z	$7,71-0,29X_1-0,07X_2-0,09X_3+0,65X_1X_2+0,31X_1X_3-0,36X_2X_3+0,18X_1X_2X_3$	$12,82-0,80v+69,10S_r+41,94t+13,61vS_r-2,15vt-49,25S_r t+346,92vS_r t$	$8,90+0,26X_1-0,39X_2+0,32X_3-0,09X_1X_2+0,04X_1X_3+0,08X_2X_3-0,07X_1X_2X_3$	$10,28-0,33v-176,67S_r-31,67t+23,33vS_r+3,58vt-21,60S_r t-197,50vS_r t$
K	$0,02+0,01X_1+0,01X_2+0,01X_3+0,01X_1X_2+0,01X_1X_3+0,01X_2X_3+0,01X_1X_2X_3$	$0,04v-0,86S_r-0,15t+0,07vS_r+0,01vt-9,77S_r t+0,96vS_r t$	$0,04+0,01X_1+0,01X_2+0,01X_3+0,01X_1X_2+1,00X_1X_3+0,01X_2X_3+0,01X_1X_2X_3$	$0,03+0,01v+1,59S_r+0,03t-0,16vS_r+9,49vt-21,60S_r t-0,76vS_r t$

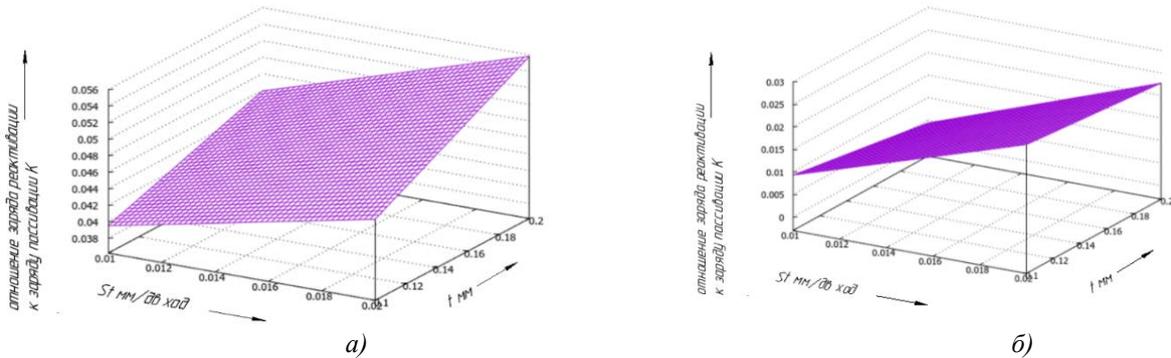


Рис. 1. Зависимость коэффициента K от подачи врезанием S_r , глубины резания t при скорости стола $v_{ст}$, равной 8 м/мин:

a – при обычном шлифовании; *б* – при шлифовании с использованием УЗ колебаний

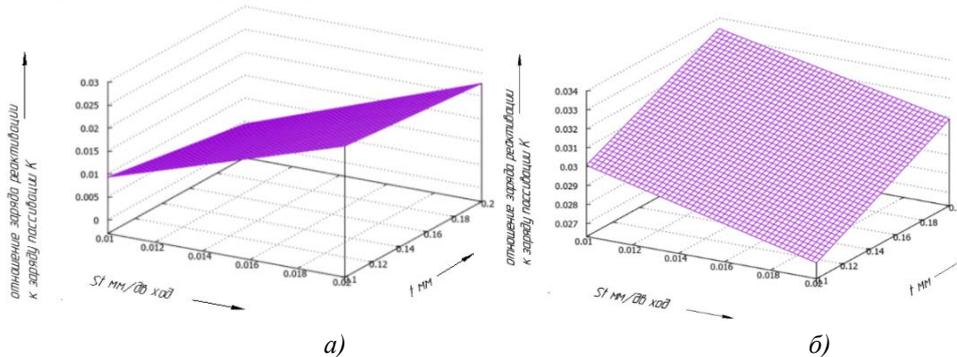


Рис. 2. Зависимость коэффициента K от подачи врезанием S_r , глубины резания t при скорости стола $v_{ст}$, равной 12 м/мин:

a – при обычном шлифовании; *б* – при шлифовании с использованием УЗ колебаний

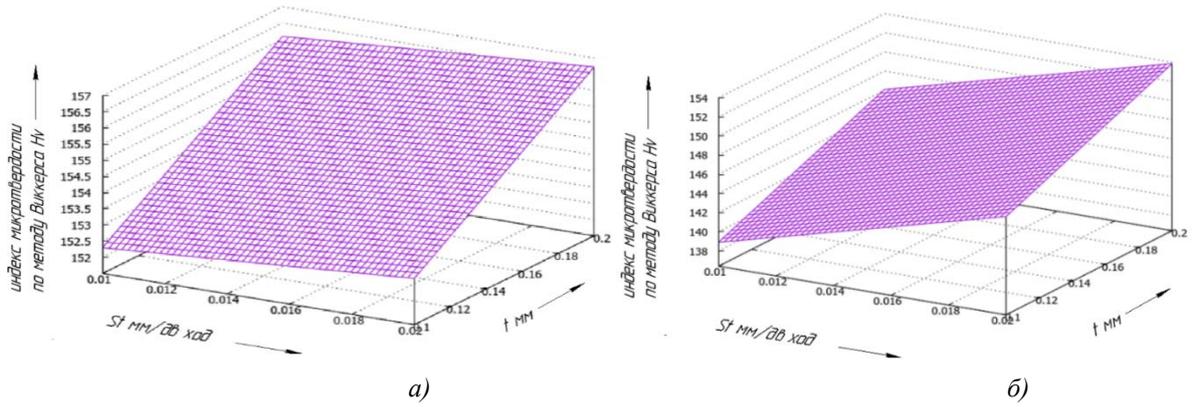


Рис. 3. Зависимость индекса микротвердости HV от подачи врезанием S_f , глубины резания t при скорости стола $v_{ст}$, равной 8 м/мин:

a – при обычном шлифовании; *б* – при шлифовании с использованием УЗ колебаний

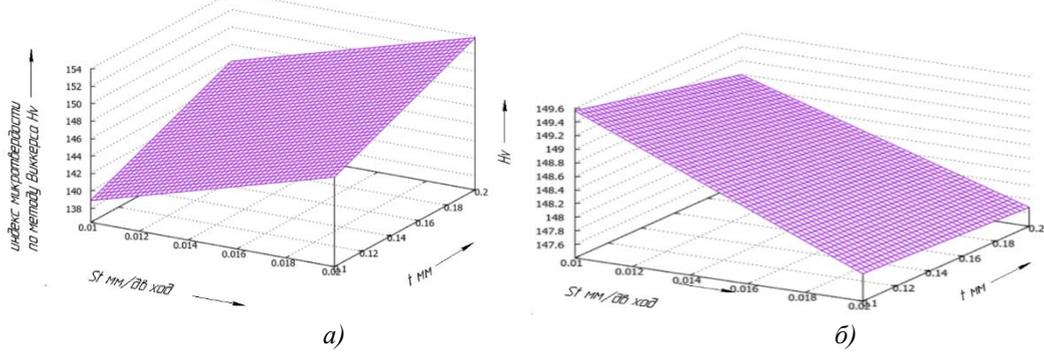


Рис. 4. Зависимость индекса микротвердости HV от подачи врезанием S_f , глубины резания t при скорости стола $v_{ст}$, равной 12 м/мин:

a – при обычном шлифовании; *б* – при шлифовании с использованием УЗ колебаний

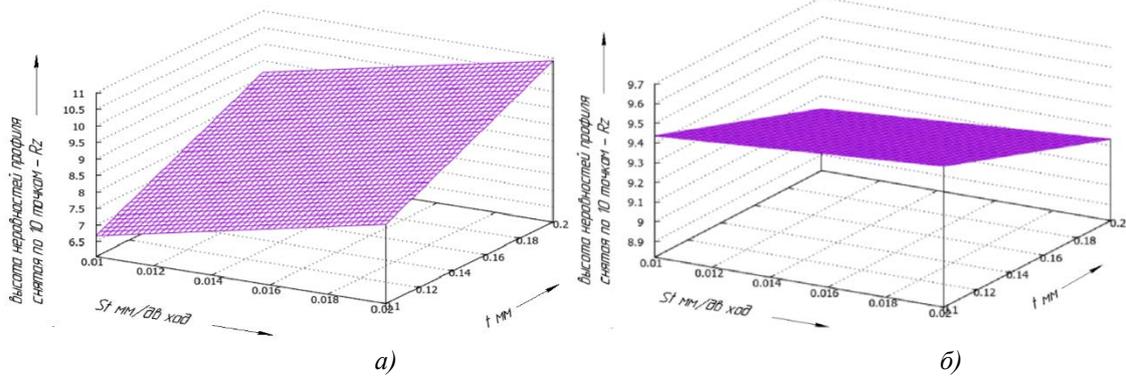


Рис. 5. Зависимость средней высоты профиля Rz от подачи врезанием S_f , глубины резания t при скорости стола $v_{ст}$, равной 8 м/мин:

a – при обычном шлифовании; *б* – при шлифовании с использованием УЗ колебаний

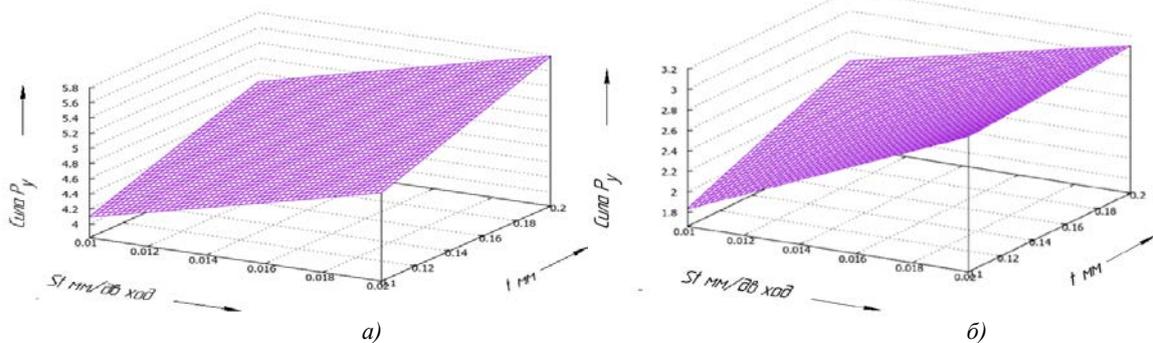


Рис. 6. Зависимость радиальной составляющей силы шлифования P_y от подачи врезанием S_f , глубины резания t при скорости стола $v_{ст}$, равной 8 м/мин:

a – при обычном шлифовании; *б* – при шлифовании с использованием УЗ колебаний

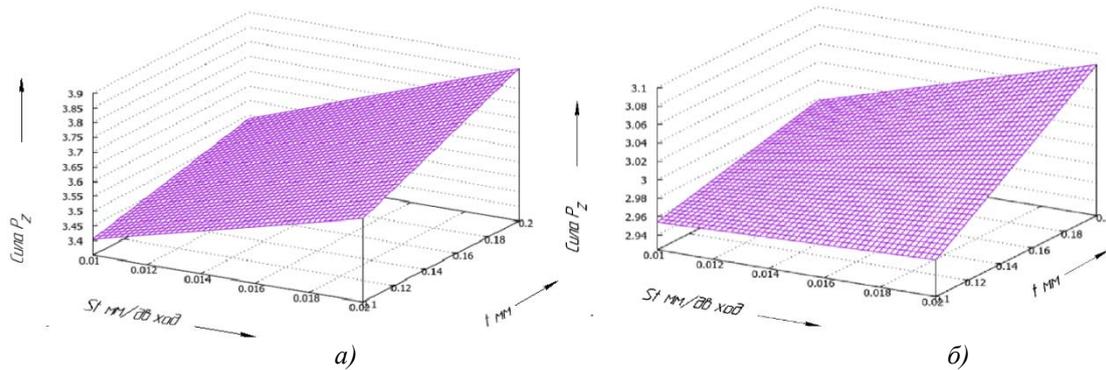


Рис. 7. Зависимость касательной составляющей силы шлифования P_z от подачи врезанием S , глубины резания t при скорости стола $v_{ст}$, равной 8 м/мин:

а – при обычном шлифовании; б – при шлифовании с использованием УЗ колебаний

Для повышения коррозионной стойкости деталей машин необходимо уменьшать шероховатость поверхности деталей машин, наклеп и растягивающие остаточные напряжения в поверхностном слое. Таким образом, повышение коррозионной стойкости шлифованных деталей из нержавеющей сталей путем введения в зону формообразования энергии ультразвукового поля является достаточно эффективным резервом увеличения долговечности ответственных деталей машин и оборудования, работающих в агрессивных средах.

Аналогичные результаты получены при шлифовании образцов из нержавеющей сталей аустенитно-мартенситного (07X16H6) и мартенситно-ферритного (14X17H2) классов коррозионной стойкости.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лучкин, Р.С. Коррозия и защита металлических материалов (структурные и химические факторы). – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2017. – 269 с.
2. Паршин, А.М., Тиханов, А.Н., Кикичев, Р.Н. Коррозия металлов в ядерном энергомашиностроении. – СПб: Политехника, 2000. – 104 с.
3. Физико-технологические основы методов обработки / под ред. А.П. Бабичева / А.П. Бабичев, М.А. Тамаркин, В.А. Лебедев и др. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2006. – 409 с.
4. Кумабэ, Д. Вибрационное резание. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.
5. Киселев, Е.С., Малышев, В.И., Ковальнов, В.Н. Новые ультразвуковые технологии изготовления деталей машин. – Тольятти: ТГУ, 2014. – 327 с.
6. Киселев, Е.С. Интенсификация процессов

механической обработки использованием энергии ультразвукового поля. – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 186 с.

7. Киселев, Е.С. Современные ультразвуковые размерные технологии механической обработки заготовок из труднообрабатываемых и композиционных материалов // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2020. – №9 (111). – С. 33-39.

8. Киселёв, Е.С., Благовский, О.В. Управление формированием остаточных напряжений при изготовлении ответственных деталей. – Санкт-Петербург: Лань, 2020. – 140 с.

REFERENCES

1. Luchkin, R.S. Metallics corrosion and prevention (structural and chemical factors), Tolyatti: TGU Publ., 2017, 269 p.
2. Parshin, A.M., Tikhonov, A.N., Kikichev, R.N. Corrosion of Metals in Nuclear Power Machine Engineering [in Russian], St. Petersburg: Politekhnik, 2000, 104 p.
3. Physical-technological fundamentals of processing methods./ A.P. Babichev, M.A. Tamarkin, V.A. Lebedev, et al. Textbook, manual for universities, Rostov-on-Don, Phoenix, 2006, 409 p.
4. Kumabe, D. Vibrating cutting. Moscow: Mechanical Engineering, 1985, 424 p.
5. Kiselev E.S., Malyshev V.I., Kovalnogov V.N. New ultrasonic technologies of machine parts production. Tolyatti: TGU Publ., 2014, 327 p.
6. Kiselev, E.S. Intensification of machining processes using the energy of the ultrasonic field: a training manual, Ulyanovsk: UISTU, (2003), 186 p.
7. Kiselev, E.S. Modern ultrasonic dimensional technologies of mechanical processing of hard-to-process and composite materials / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2020, No. 9 (111), pp. 33-39.
8. Kiselev, E.S., Blagovsky, O.V. Controlling the formation of residual stresses in the manufacture of critical parts. Monography, St. Petersburg: Lan, 2020, 140 p.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 23.11.2021; одобрена после рецензирования 14.12.2021; принята к публикации 30.12.2021.

The article was submitted 23.11.2021; approved after reviewing 14.12.2021; accepted for publication 30.12.2021.