

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. №7 (181). С. 19-27.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. №7 (181). P. 19-27.

Научная статья

УДК 536:621.9

doi: 10.30987/2223-4608-2026-7-19-27

Влияние условий шлифования заготовок из аустенитных нержавеющей сталей на коррозионную стойкость деталей

Евгений Степанович Киселев¹, д.т.н.

Николай Владимирович Мезин², инженер

¹ Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

² Ульяновский механический завод, Ульяновск, Россия

¹ kec.ulstu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1745-9016>

² macbet@list.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния условий обработки на коррозионную стойкость шлифованных деталей из нержавеющей хромоникелевой стали аустенитного класса 12Х18Н9Т2. Установлено, что уменьшение теплосиловой напряженности процесса шлифования заготовок путем изменения условий шлифования (варьированием значений элементов режима шлифования, введением в зону обработки энергии УЗ поля, замены традиционных абразивных кругов на сверхтвердые и использованием высокоэффективных составов и техники применения СОЖ) являются эффективными средствами повышения и управления заданных значений коррозионной стойкости деталей машин из аустенитных нержавеющей сталей. Как показывает анализ результатов экспериментальных исследований, наибольшее влияние оказывает введение УЗК при изменении поперечной подачи на двойной ход.

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

Для цитирования: Киселев Е.С., Мезин Н.В. Влияние условий шлифования заготовок из аустенитных нержавеющей сталей на коррозионную стойкость деталей // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. № 7 (181). С. 19–27. doi: 10.30987/2223-4608-2026-7-19-27

The effect of grinding conditions for austenitic stainless steel workpieces on the corrosion resistance of parts

Evgeny S. Kiselev¹, D. Eng.

Nikolay V. Mezin², engineer

¹ Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

² Ulyanovsk Mechanical Plant (UMZ), Ulyanovsk, Russia

¹ kec.ulstu@mail.ru

² macbet@list.ru

Abstract. Research results of the effect of grinding conditions on the corrosion resistance of grinded parts made of austenitic grade 12Cr18Ni9Ti2 stainless chromium-nickel steel are presented. It has been found that reducing the heat and power intensity of the workpiece grinding process by changing grinding conditions (through varying the values of the grinding mode elements, introducing ultrasonic field energy into the processing zone, replacing traditional abrasive wheels with superhard ones and using highly efficient compositions and coolant techniques) are effective means of increasing and controlling the set values of corrosion resistance of machine parts made of austenitic stainless steels. As the analysis of the results of experimental studies shows, the introduction of a narrow channel has the greatest effect when changing the transverse feed to a double pass.

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

For citation: Kiselev E.S., Mezin N.V. The effect of grinding conditions for austenitic stainless steel workpieces on the corrosion resistance of parts / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. № 7 (181). P. 19–27. doi: 10.30987/2223-4608-2026-7-19-27

Введение

Нержавеющие хромоникелевые стали аустенитного класса находят широкое применение в качестве основного конструкционного материала различных деталей и узлов оборудования атомных электростанций, морских и речных судов и др. изделий, работающих в контакте с водным теплоносителем. Основная причина их применения – высокая коррозионная стойкость в водных средах. Из данных сталей изготавливают также детали, работающие в условиях повышенной влажности, в слабо- и высоко агрессивных средах, при обычных и высоких температурах, невысоких и значительных механических нагрузках. Детали этого класса сталей находят применение и при изготовлении систем, рассчитанных на работу при крайне низких температурах. Однако их прочность, пластичность и другие механические свойства зачастую оказываются недостаточными – например, для функционирования в открытом космосе или для создания ответственных элементов криогенной техники. Коррозионная стойкость деталей после обработки со съёмом припуска отчасти зависит от параметров шероховатости поверхности. Общеизвестно, что после механической обработки на черновых режимах коррозионная стойкость ниже, а при чистовых – выше. Как правило, это объясняется особенностями микрогеометрии поверхностного слоя (ПС): при больших значениях высотных параметров шероховатости больше и площадь контакта обработанных поверхностей с водным теплоносителем или с другой внешней агрессивной окружающей средой.

Согласно стандарту ГОСТ 5272-68 «Коррозия металлов. Термины» под коррозией металлов понимается разрушение материалов, обусловленное их химическим или электрохимическим взаимодействием с окружающей средой, вызывающей коррозию. Разумеется, такие взаимодействия обусловлены не только параметрами шероховатости. Важнейшим для практики, является наличие малых скоростей общей коррозии при контакте с водным тепло-

носителем и быстрого растворения металла по границам зерен с последующим разрушением связей между зёрнами или межкристаллитной коррозии (МКК).

Возникновение склонности к МКК обычно происходит из-за выпадения по границам зерен сталей, богатых хромом, карбидных фаз (сенсбилизация). Особое внимание предьявляется к устойчивости против МКК хромоникелевых коррозионностойких сталей, когда сочетание сенсбилизированного и напряженного состояний может вызывать хрупкое коррозионное разрушение или межкристаллитное коррозионное растрескивание (МКР) под напряжением. Можно предположить, что на этот процесс немаловажное влияние оказывают не только структурно-фазовые изменения, сформированные в процессе изготовления заготовки до обработки со снятием припусков, или возникающие при теплонапряженных процессах окончательной механической обработки (как правило, при шлифовании), но и технологические остаточные напряжения (ТОН). В отличие от качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей, изготовленных различными методами формообразования, исследования взаимосвязи коррозионной стойкости деталей с условиями шлифования ведутся относительно недавно. Поэтому в информационном пространстве результатов исследований возможностей шлифования по обеспечению необходимой коррозионной стойкости ПС наблюдается определенный дефицит.

Методы исследований и материалы

Причиной склонности сплавов к МКК чаще всего являются структурные изменения – выделение новых фаз на границах зёрен, которое происходит при выполнении технологических операций в опасном температурном интервале. Есть несколько теорий объясняющие возникновение межкристаллитной коррозии. Наибольшим признанием пользуется теория локального обеднения границ зёрен хромом вследствие образования на их границах карби-

дов [1]. Суть этой теории заключается в том, что при нагреве стали в критическом интервале температур 500...700 °С (для разных сталей этот интервал различен) происходит выпадение из твёрдого раствора (аустенита) по границам зёрен сложных карбидов железа и хрома типа $(Cr, Fe)_3C_2$ или $(Cr, Fe)C_6$.

Диффузия углерода к границам протекает быстрее, чем диффузия хрома. Поэтому на образование карбидов расходуется не только имеющийся там запас углерода, но и углерод, диффундируемый из внутренней зоны зёрен. В то же время хром, необходимый для образования карбидов, поступает первоначально только с границ или приграничных зон зерна аустенита. В результате содержание хрома в приграничных участках зёрен аустенита становится менее 12,5 % (имеется многочисленная информация об уменьшении хрома до 6,5 %), что недостаточно для обеспечения их коррозионной стойкости. Между тем, нержавеющие или коррозионностойкие стали, как известно, относятся к числу труднообрабатываемых материалов, что связано с их особыми физико-механическими свойствами: высокой прочностью при обычных и повышенных температурах, высокой пластичностью и вязкостью, слабой окисляемостью, низкой теплопроводностью и теплоемкостью. Особенно низок уровень обрабатываемости заготовок из коррозионностойких сталей аустенитного класса шлифованием. Однако именно на операциях шлифования, как правило, формируются выходные показатели качества поверхности и ПС детали [1, 2]. Поэтому, вероятность коррозионных повреждений деталей в процессе изготовления, при прочих равных условиях, весьма велика. Последнее объясняется тем, что из всех видов формообразования деталей со снятием припусков шлифование является одним из самых теплонапряженных.

В связи с большим сопротивлением коррозионностойкой стали упругой и пластической деформации при высоких температурах, малой теплопроводностью и теплоемкостью, напряженными фрикционными процессами в контакте абразивное зерно – заготовка расчетные и экспериментальные значения температур в зоне шлифования получаются более высокими, чем при обработке углеродистых и низколегированных сталей. Расчетное значе-

ние мгновенной температуры при шлифовании заготовок из стали 12X18H9T может составлять до 1100 °С [3]. В результате увеличения температуры поверхностного слоя заготовки возрастает амплитуда колебаний атомов относительно положения их равновесия, что увеличивает вероятность их удаления из узлов решетки и приводит к росту количества вакансий и дислоцированных атомов. Возрастает количество других дефектов кристаллической решетки, прежде всего дислокаций. Пластически деформируемые поверхности излучают поток электронов, причем особенно интенсивно в момент разрыва металлических связей.

Необычайно высокой концентрации энергии на контактирующих поверхностях в тяжелых режимах граничного трения способствует накопление энергии большим числом дефектов в кристаллической решетке металла и возникновение сильных искажений на границах его структурных составляющих [1]. В поверхностном слое заготовки, нагретом сверх критической температуры, протекают структурно-фазовые превращения, химические реакции, выгорание легирующих элементов, обезуглероживание, образование вторичных карбидов. Структурно-измененные поверхностные слои отличаются от нижележащих плотностью, твердостью и другими физико-механическими свойствами. Поэтому возможно их разупрочнение [6]. Как правило, в действующих технологических процессах структурно-фазовые превращения при механической обработке стремятся исключить, минимизировать химические реакции и массоперенос легирующих элементов. К числу наиболее известных средств снижения теплосиловой напряженности в зоне шлифования относятся: использование высокоэффективных составов и техники подачи смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) [5], введение в контакт с заготовкой режущего инструмента с абразивными зёрнами из сверхтвёрдых материалов (в нашем случае – эльборных взамен традиционных абразивных кругов), формообразование новых поверхностей деталей машин с использованием энергии ультразвукового (УЗ) поля [6]. В последнем случае, сокращаются затраты на трение абразивного круга о заготовку, снижаются контактные температуры в зоне шлифования, а дополнительные ультразвуковые колебания (УЗК)

способствуют релаксации возникающих термических, силовых и структурно-фазовых технологических остаточных напряжений. Учитывая, что теплосиловая напряженность в существенной степени определяется элементами режима шлифования, была поставлена задача прямыми экспериментами выявить влияние каждого из них на коррозионную стойкость плоских поверхностей деталей из аустенитной нержавеющей стали 12X18H10T.

Для оценки межкристаллитной коррозии в исследованиях использовали потенциостат-гальваностат «Р20Х» при трех электродной схеме подключения к электрохимической ячейке с использованием платинового электрода сравнения и вспомогательного электрода. Образец (исследуемая поверхность) выдерживается в электролите, состоящем из водного раствора серной кислоты H_2SO_4 и роданистого калия KCNS (активатора). После установления потенциала коррозии образец поляризуют потенциодинамически в положительную (анодную) сторону, в область пассивности материала. Максимальный анодный ток активного растворения металла отображается в виде пика I_p на поляризационной кривой пассивации (прямой ход), (рис. 1, а). При наличии в материале обедненных хромом участков, менее

стабильная пассивная пленка разрушается, и регистрируется пик анодного растворения – пик реактивации (рис. 1, а), характеризующийся максимальным током анодного растворения при реактивации I_r . Из области пассивности материал поляризуют в отрицательном (катодном) направлении. При отсутствии в материале обедненных хромом участков пассивная пленка растворяется с очень малой скоростью, регистрируемые анодные токи малы (рис 1, б) [7].

При наличии стабильного состояния пассивности, возможна регистрация отрицательных токов. Степень сенсibilизации материала (выделение карбидов хрома по границам зерен) при нагревании приводит к обеднению границ зерен по хром и усилению чувствительности к коррозии), что, обычно, оценивают коэффициентом реактивации. Последний определяется отношением максимального тока анодного растворения при реактивации I_r к максимальному току анодного растворения при пассивации I_p и оценивается в процентах

$$K = \frac{I_p}{I_n} \cdot 100 \%. \quad (1)$$

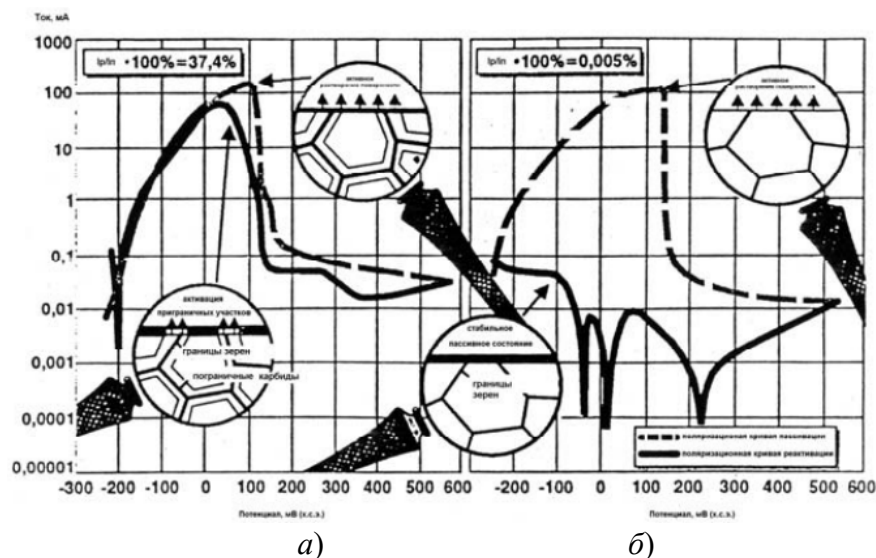


Рис. 1. Потенциодинамические поляризационные кривые прямого (пассивация) и обратного (реактивация) хода

Fig. 1. Potentiodynamic polarization curves of forward (passivation) and reversed (reactivation) motion

Оценка степени сенсibilизации посредством коэффициента реактивации позволяет сделать заключение о склонности к меж-

кристаллитной коррозии нержавеющей сталей и изготовленного из них оборудования.

Степень изменений фазового состава аустенита (ФС) материала в ПС обработанных образцов при исследованиях оценивали на рентгеновском измерительном комплексе «Рикор-7» [6] с применением медного катода. Соотношение γ -железа и α -железа в объеме ПС определяли при настройке трубки катода на угол дифракции $2\theta \approx 44^\circ$. При этом достигается максимальная интенсивность пиков аустенита (γ -железо, плоскость {111}, $2\theta \approx 43,5^\circ$) и феррита (α -железо, плоскость {110}, $2\theta \approx 44,5^\circ$), что позволяет использовать значения интенсивностей их пиков для определения соотношения объемов этих фаз.

Сравнительные экспериментальные исследования осуществляли с использованием многофакторного плана при шлифовании заготовок из аустенитной коррозионностойкой стали 12X18H9T2 с введением и без введения в зону формообразования новых поверхностей энергии УЗ поля [6] с использованием оригинальной УЗ установки для наложения УЗК на обрабатываемую заготовку при плоском шлифовании [6]. В зону контакта абразивного круга с заготовкой подавали свободно падаю-

щей струей или поливом 3 %-ным водным раствором концентрата полусинтетической СОЖ Cimkool-20 с расходом 20 л/мин. Результаты данных экспериментов сравнивали с ранее выполненными исследованиями [7], при шлифовании с электрокорундовыми кругами по аналогичной методике на плоскошлифовальном станке 3В710.

Учитывая, что коррозионная стойкость обработанных со съемом припусков поверхностей зависит от ряда параметров качества поверхностного слоя, в процессе исследований для оценки параметров шероховатости использовали профилометр-профилограф мод. 130. Кроме того, измеряли технологические остаточные напряжения III рода с использованием аппаратуры рентгеновского измерительного комплекса «РИКОР-4» для неразрушающего контроля остаточных напряжений в металлах и сплавах [6].

Элементы режима шлифования эльборным (Л05 100 % 61 81,5) и электрокорундовым (25А F60 L7 V35) кругами представлены в табл. 1 и 2

1. Элементы режима шлифования эльборным кругом

1. Elements of the grinding mode with a cubic boron nitride disc

Контролируемые параметры	Скорость продольной подачи стола $v_{ст}$, м/мин	Скорость поперечной подачи стола S_t , мм/ход стола	Глубина резания t , мм
	X_1	X_2	X_3
Верхний уровень (+)	12	0,01	1,0
Нижний уровень (-)	8	0,002	0,5
Основной уровень	10	0,006	0,75
Интервал варьирования	2	0,004	0,25

2. Элементы режима шлифования кругом из электрокорунда

2. Elements of the grinding mode with an electrocorundum rotary grindstone

Контролируемые параметры	$v_{с.}$, м/мин	S_t , мм/ход стола	t , мм
	X_1	X_2	X_3
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

Результаты экспериментальных исследований зависимости основных показателей качества шлифованных деталей от условий обработки представлены в табл. 3.

3. Зависимость параметров качества шлифованных поверхностей от условий обработки

3. The dependence of the quality parameters of the grinding on the grinding conditions

Элементы режима шлифования			Параметры качества поверхностного слоя							
			При обычном шлифовании				При шлифовании с УЗК			
S_t , мм/ дв. ход	t , мм	$v_{ст}$, м/ мин	Ra , мкм	ФС, %	ТОН, МПа	K	Ra , мкм	ФС, %	ТОН, МПа	K
0,002	0,5	8,0	0,41	17,4	584	0,0147	0,40	13,1	500	0,0114
0,005	0,5	8,0	0,43	18,0	597	0,0149	0,40	14,5	515	0,0117
0,008	0,5	8,0	0,46	18,6	600	0,0150	0,41	15,8	529	0,0121
0,01	0,5	8,0	0,48	19,1	603	0,0151	0,41	17,2	544	0,0126
0,002	0,7	8,0	0,57	19,1	610	0,0152	0,43	13,8	545	0,0138
0,005	0,7	8,0	0,62	19,9	616	0,0153	0,45	14,0	547	0,0142
0,008	0,7	8,0	0,96	20,2	622	0,0155	0,55	14,2	553	0,0143
0,01	0,7	8,0	1,07	21,4	623	0,0159	0,78	14,8	557	0,0145
0,002	1,0	8,0	1,12	21,6	628	0,0162	1,00	16,1	562	0,0150
0,005	1,0	8,0	1,19	21,8	630	0,0166	1,04	17,0	588	0,0160
0,008	1,0	8,0	1,26	22,2	632	0,0174	1,08	19,7	614	0,0166
0,01	1,0	8,0	1,33	25,3	635	0,0180	1,12	22,1	640	0,0170
0,002	0,5	12,0	0,52	19,9	636	0,0168	0,47	14,4	624	0,0142
0,005	0,5	12,0	0,56	20,9	637	0,0174	0,47	16,2	640	0,0144
0,008	0,5	12,0	0,60	21,1	641	0,0178	0,48	18,0	655	0,0146
0,01	0,5	12,0	0,64	21,8	645	0,0180	0,48	19,9	670	0,0148
0,002	0,7	12,0	0,67	22,0	638	0,0182	0,54	14,0	675	0,0153
0,005	0,7	12,0	0,76	22,3	640	0,0183	0,62	14,2	681	0,0156
0,008	0,7	12,0	0,90	22,3	642	0,0186	0,75	14,5	684	0,0159
0,01	0,7	12,0	1,23	22,5	644	0,0188	0,97	14,8	887	0,0160
0,002	1,0	12,0	1,45	22,8	646	0,0190	1,28	15,0	690	0,0167
0,005	1,0	12,0	1,51	23,6	656	0,0193	1,32	17,3	712	0,0173
0,008	1,0	12,0	1,57	24,4	676	0,0200	1,40	19,7	735	0,0180
0,01	1,0	12,0	1,62	25,2	688	0,0208	1,42	22,0	760	0,0185

Как следует из анализа результатов исследований, представленных в табл. 3, изменение условий шлифования оказывает существенное влияние на коррозионную стойкость деталей из аустенитных нержавеющей сталей. Выполненные исследования подтверждают влияние на коррозионную стойкость не только параметров шероховатости и изменений фазового состава ПС готовой детали, но технологических остаточных напряжений, возникающих при шлифовании. Очевидна взаимосвязь коррозионной стойкости с элементами режима шлифования и другими условиями обработки (введением в зону формирования ПС энергии

УЗ поля, использование высокоэффективных составов и техники подачи СОЖ и др. [5]), способствующих снижению теплосиловой напряженности процесса обработки.

Результаты сравнительных исследований при шлифовании эльборным и электрокорундовым кругом, представленные на рис. 2 и рис. 3, лишь подтверждают сделанные выше выводы, так как общеизвестно, что использование сверхтвердых эльборных кругов, характеризуется существенно меньшей теплосиловой напряженностью в сравнении с кругами из электрокорунда [2].

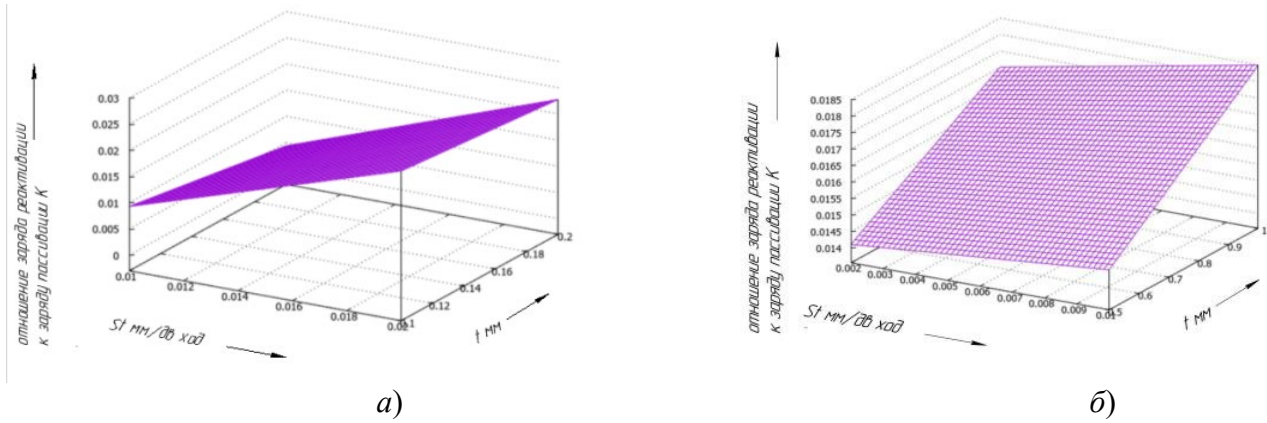


Рис. 2. Зависимость коэффициент реактивации K от подачи врезания S_t глубины резания t с использованием УЗК при скорости стола $v_{ст} = 8$ м/мин при шлифовании:
а – кругом из электрокорунда; б – эльборным кругом

Fig. 2. The dependence of the reactivation coefficient K on the cutting feed S_t of the cutting depth t using UV (ultrasonic vibrations) at a bench speed $v_b = 8$ m/min during grinding:
а – with an electrocorundum rotary grindstone; б – with a cubic boron nitride disc

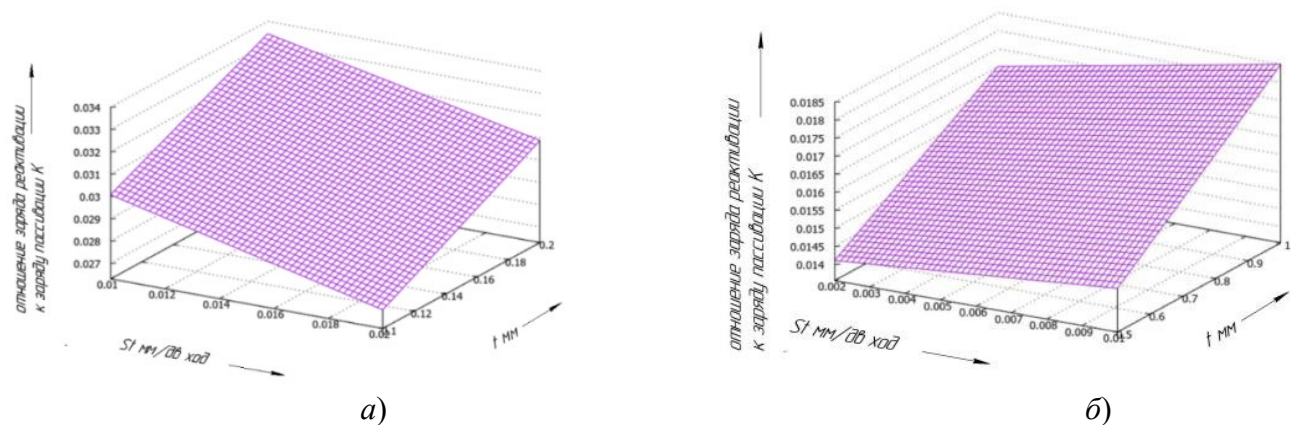


Рис. 3. Зависимость коэффициент реактивации K от подачи S_t глубины резания t с использованием УЗК при скорости стола $v_{ст} = 12$ м/мин при шлифовании:
а – кругом из электрокорунда; б – эльборным кругом

Fig. 3. The dependence of the reactivation coefficient K on the cutting feed S_t of the cutting depth t using UV (ultrasonic vibrations) at a bench speed $v_b = 12$ m/min during grinding:
а – with an electrocorundum rotary grindstone; б – with a cubic boron nitride disc

Регрессионные зависимости для определения коэффициента реактивации K для круга из электрокорунда представлены в виде уравнений:

Уравнение регрессии для расчета K без наложения УЗК на скорости стола 8 м/мин

$$K = 0,32 - 0,44 \cdot S_t - 0,07 \cdot t + 3,39 \cdot S_t \cdot t; \quad (2)$$

Уравнение регрессии для расчета K с наложением УЗК на скорости стола 8 м/мин

$$K = 0,03 - 0,31 \cdot S_t + 0,03 \cdot t + 3,41 \cdot S_t \cdot t; \quad (3)$$

Уравнение регрессии для расчета K без наложения УЗК на скорости стола 12 м/мин

$$K = 0,48 - 0,04 \cdot S_t - 0,03 \cdot t - 1,75 \cdot S_t \cdot t; \quad (4)$$

Уравнение регрессии для расчета K с наложением УЗК на скорости стола 12 м/мин

$$K = 0,03 - 0,33 \cdot S_t + 0,03 \cdot t - 0,37 \cdot S_t \cdot t. \quad (5)$$

Регрессионные зависимости для определения коэффициента реактивации K для круга из эльбора представлены в виде уравнений:

Уравнение регрессии для расчета K без наложения УЗК на скорости стола 8 м/мин

$$K = 0,013 + 0,662 \cdot S_t + 0,091 \cdot t + 0,347 \cdot S_t \cdot t; \quad (6)$$

Уравнение регрессии для расчета K с наложением УЗК на скорости стола 12 м/мин

$$K = 0,007 + 0,099 \cdot S_t + 0,091 \cdot t + 0,062 \cdot S_t \cdot t; \quad (7)$$

Уравнение регрессии для расчета K без наложения УЗК на скорости стола 12 м/мин

$$K = 0,015 - 0,108 \cdot S_t + 0,015 \cdot t + 0,036 \cdot S_t \cdot t; \quad (8)$$

Уравнение регрессии для расчета K с наложением УЗК на скорости стола 12 м/мин

$$K = 0,01261 - 0,4914 \cdot S_t + 0,0047 \cdot t + 0,118 \cdot S_t \cdot t. \quad (9)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований подтверждают сделанные предположения, что уменьшение теплосиловой напряженности процесса шлифования заготовок путем изменения условий шлифования (варьированием значений элементов режима шлифования, введением в зону обработки энергии УЗ поля, замены традиционных абразивных кругов на сверхтвердые и использованием высокоэффективных составов и техники применения СОЖ) являются эффективным средствами повышения и управления заданных значений коррозионной стойкости деталей машин из аустенитных нержавеющей сталей. Коррозионная стойкость (по показателю коэффициент реактивации K) увеличивается до 2 – 4 раз в зависимости от элементов режима и условий шлифования. Следует отметить, что, несмотря на увеличение режущей способности эльборного круга (при естественным уменьшением высотных параметров шероховатости из-за его меньшей зернисто-

сти), с введением УЗ энергии в контактные зоны при шлифовании коэффициент реактивации K дополнительно уменьшается и зависит, в основном, от элементов режима резания. Как показывает анализ результатов экспериментальных исследований, наибольшее влияние оказывает введение УЗК при изменении поперечной подачи на двойной ход.

Измерения величины и глубины залегания растягивающих технологических остаточных напряжений III рода показали уменьшение их величин 10...15 %. При обработке с использованием УЗК, шероховатость поверхности улучшается (уменьшается параметр шероховатости Ra). Это объясняется тем, что за счет ультразвуковых колебаний увеличивается число зерен, диспергирующих (измельчающих) материал заготовки.

Для повышения коррозионной стойкости деталей машин необходимо уменьшать высотные параметры шероховатости поверхности деталей машин, наклеп и растягивающие остаточные напряжения в поверхностном слое.

Таким образом, повышение коррозионной стойкости шлифованных деталей из нержавеющей стали путем введения в зону формообразования энергии ультразвукового поля является важным резервом увеличения долговечности ответственных деталей машин и оборудования, работающих в агрессивных средах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гуляев А.П. Сверхпластичность стали. М.: Металлургия, 1982. 56 с.
2. Худобин Л.В. Шлифование заготовок из коррозионностойких сталей с применением СОЖ. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1989. 148 с.
3. Бокучава Г.В. Аналитическое исследование температурного поля поверхностного слоя в процессе шлифования металлов // Резание и инструмент. Харьков: Высшая школа. Изд-во при Харьковском университете, 1975. 310 с.
4. Филимонов Л.Н. Стойкость шлифовальных кругов. Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1973. 136 с.
5. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: справочник / под общ. ред. Л.В. Худобина. М.: Машиностроение, 2006. 300 с.
6. Киселев Е.С. Современные ультразвуковые размерные технологии механической обработки заготовок // Справочник. Инженерный журнал. С приложением. 2025. № 3. С. 67–87.

7. Киселев Е.С., Мезин Н.В., Штубов Н.С. Повышение коррозионной стойкости шлифованных деталей рациональным применением энергии ультразвукового поля // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 2 (128). С. 26–31.

REFERENCES

1. Gulyaev A.P. Superplasticity of steel. Moscow: Metallurgiya, 1982. 56 p.
2. Khudobin L.V. Grinding of work pieces from corrosion-resistant steels with the use of lubricoolants. Saratov: Publishing House of Saratov University. 1989. 148 p.
3. Bokuchava G.V. Analytical study of the temperature field of the surface layer in the metal grinding operation // Cutting and tools. Kharkiv: Higher School. Publishing House at Kharkov University. 1975. 310p.
4. Filimonov L.N. Durability of grinding wheels. L.: Mechanical engineering. Leningrad branch. 1973. 136 p.
5. Lubricating and cooling technological means and their application in cutting machining: Reference book. Under general ed. by L.V. Khudobin. Mashinostroenie, Moscow. 2006. 300 p.
6. Kiselev E.S. Modern ultrasonic dimensional technologies of blanks machining // Engineering Handbook. Engineering magazine. Attaching. 2025. No. 3. pp. 67–87.
7. Kiselev E.S., Mezin 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.

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 12.01.2026; одобрена после рецензирования 27.01.2026; принята к публикации 22.03.2026.

The article was submitted 12.01.2026; approved after reviewing 27.01.2026; assepted for publication 22.03.2026.