

УДК 669.018.822, 620.193, 621.941, 621.914
doi: 10.21685/2072-3059-2024-4-12

Современные технологические приемы повышения эффективности механической обработки коррозионностойких сталей, работающих в агрессивных средах

Т. Н. Иванова

Удмуртский федеральный исследовательский центр
Уральского отделения Российской академии наук, Ижевск, Россия;
Чайковский филиал Пермского национального исследовательского
политехнического университета, Чайковский, Пермский край, Россия
rsg078829@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Анализ работы стальных деталей и узлов, функционирующих в агрессивных средах, показал, что для повышения стойкости к коррозионному растрескиванию сталь должна соответствовать определенным требованиям по химическому составу, механическим и технологическим свойствам, включая обрабатываемость резанием. Целью исследования является обоснование технологических приемов обеспечения этих требований, а также повышения эффективности механической обработки легированных коррозионностойких сталей, работающих в агрессивных средах. *Материалы и методы.* В качестве приема повышения эффективности механической обработки легированных коррозионностойких сталей, работающих в агрессивных средах, было выбрано использование режущих инструментов с прогрессивной пластиной Osprey® CE с минимальным количеством смазки с контролируемой подачей 50–80 мл/г биоразлагаемого синтетического масляного эфира, распыляемого на режущую кромку резца сжатым воздухом под высоким давлением с высокой скоростью для механической обработки инструментом с круглыми пластинами Osprey® CE и наложением тангенциальных ультразвуковых колебаний. *Результаты.* В результате проведенных испытаний на коррозионное растрескивание сталей после механической обработки режущими инструментами с пластинами Osprey® CE установлено, что термообработанные стали 03X22H6M2, 12X18H9, функционирующие в агрессивной среде с повышенной концентрацией хлоридов и при наличии остаточных напряжений 200–210 МПа, работоспособны до разрушения 1200 ч; при снижении нагрузки до 100–120 МПа время до разрушения увеличивается на 30–34 %. *Выводы.* Экспериментальными исследованиями доказано, что применение рассматриваемых технологических приемов позволяет существенно повысить эффективность процесса механической обработки коррозионностойких сталей: сократить время на обработку до 25 %, увеличить стойкость режущей кромки на 12–14 % и скорость съема материала на 15 %.

Ключевые слова: технологические приемы, агрессивные среды, режущий инструмент, коррозионное растрескивание, коррозионностойкая сталь, стойкость, точение, фрезерование

Для цитирования: Иванова Т. Н. Современные технологические приемы повышения эффективности механической обработки коррозионностойких сталей, работающих в агрессивных средах // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 4. С. 143–156. doi: 10.21685/2072-3059-2024-4-12

Modern technological techniques improving the efficiency of mechanical processing corrosion-resistant steels, working in aggressive environments

T.N. Ivanova

Udmurt Federal Research Center, Ural branch
of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia;
Tchaikovsky branch of the Perm National Research Polytechnic University,
Tchaikovsky, Perm Region, Russia
rsg078829@mail.ru

Abstract. *Background.* Analysis of the performance of steel parts and units operating in aggressive environments has shown that to increase resistance to stress corrosion cracking, steel must meet certain requirements for chemical composition, mechanical and technological properties, including machinability. The purpose of the research is to substantiate technological methods for ensuring these requirements, as well as increasing the efficiency of mechanical processing of alloyed corrosion-resistant steels operating in aggressive environments. *Materials and methods.* The method under study for increasing the efficiency of machining of alloyed corrosion-resistant steels operating in aggressive environments was the use of cutting tools with a progressive Osprey® CE plate, a minimum amount of lubrication with a controlled supply of 50 - 80 ml / g of biodegradable synthetic oil ester sprayed onto the cutting edge of the cutter with compressed air under high pressure and at high speed, machining with a tool with round Osprey® CE plates and the imposition of tangential ultrasonic vibrations. *Results.* As a result of tests conducted on stress-corrosion cracking of steels after mechanical processing with cutting tools with Osprey® CE plates, it was established that heat-treated steels 03X22N6M2, 12X18N9 operating in an aggressive environment with an increased concentration of chlorides and in the presence of residual stresses of 200 - 210 MPa are operational before failure for 1200 hours; when the load is reduced to 100 - 120 MPa, the time before failure increases by 30 - 34%. *Conclusions.* Experimental studies have shown that the use of the studied technological methods allows to significantly increase the efficiency of the process of mechanical processing of corrosion-resistant steels: to reduce the processing time by up to 25%, to increase the durability of the cutting edge by 12-14% and the material removal rate by 15%.

Keywords: technological methods, aggressive environments, cutting tool, stress corrosion cracking, corrosion-resistant steel, durability, turning, milling

For citation: Ivanova T.N. Modern technological techniques improving the efficiency of mechanical processing corrosion-resistant steels, working in aggressive environments. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* = *University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2024;(4):143–156. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2024-4-12

Введение

Сталь на протяжении многих веков играет огромную роль в развитии человеческой цивилизации как самый эффективный материал по прочности, износоустойчивости, экологичности и т.д. По данным Всемирной ассоциации производителей стали, ее мировое производство за январь–апрель 2023 г. составило в Азии и Океании – 121,1 млн т, в России – 28,9 млн т, Европейском союзе – 11,1 млн т, Северной Америке – 9,2 млн т, Южной Америке – 3,6 млн т [1, 2].

Для того чтобы сталь долго служила и справлялась со своими задачами, ее необходимо, в зависимости от назначения, подвергать механико-термической обработке. Например, коррозионное растрескивание стали под действием проникающего водорода проявляется в наземном и подземном нефтегазовом оборудовании. Атомарный водород в электрохимических процессах взаимодействует с соединениями сероводорода, углекислого газа и влаги, проникает в сталь, вызывает коррозионное водородное и сульфидное растрескивание в виде вспучивания. Установлено, что водородное растрескивание характерно для малопрочных (с временным сопротивлением разрыву σ_B до 600 МПа) низколегированных сталей с феррито-перлитной структурой и протекает в ненагруженном металле (в сварных швах газопроводных труб, сепараторов). Сульфидное коррозионное растрескивание под напряжением наблюдается у низкопрочных сталей с феррито-перлитной структурой и высокопрочных сталей с сорбитной структурой, что обусловлено проникающим в сталь водородом, скапливающимся в местах трехосного напряженного состояния по границам зерен, карбидных и сульфидных частиц. Типовые стали, применяемые для трубопроводов и аппаратов, работающих в среде сероводородсодержащего газа, представлены в табл. 1, а стали используемые для изготовления насосно-компрессорных, обсадных, буровых труб и деталей подземного скважинного оборудования, – в табл. 2.

Принятие защитных мер, таких как металлические или неметаллические покрытия, термообработка (с увеличением прочности до максимально возможной, повышением температуры и выдержки), снижение агрессивности среды (обескислороживание или применение ингибиторов), позволяет увеличить стойкость стали к хлоридному коррозионному воздействию на 15–20 %. Анализ работы стальных деталей и узлов, функционирующих в агрессивных средах, показал, что для повышения стойкости к коррозионному растрескиванию сталь должна соответствовать следующим требованиям:

- низколегированные стали – состав 0,2 % С, 1,5 % Cr, 0,2 % Mo, феррито-перлитная структура; твердость HRC ≥ 22 ; предел текучести 240–400 МПа;
- легированные стали – сорбитная структура, твердость HRC ≥ 27 , предел текучести 500–800 МПа;
- высоколегированные коррозионные стали – 9–13 % Cr мартенситного класса, 25 % Cr с пределом текучести условным $\sigma_{0,2}$ до 1100 МПа феррито-аустенитного класса;
- сплавы на никелевой основе, легированные хромом до 26 % и молибденом до 7 %. Упрочнение данных сплавов достигается за счет дисперсионного твердения и холодной пластической деформации.

Целью исследования является обоснование технологических приемов повышения эффективности механической обработки легированных коррозионностойких сталей, работающих в агрессивных средах.

Использование технологических приемов механической обработки коррозионностойких сталей, работающих в агрессивных средах, расширит научную базу данных о повышении стойкости к коррозионному растрескиванию металла.

Прикладная значимость механической обработки стали будет определяться масштабами внедрения результатов в нефтегазовое производство.

Таблица 1
Углеродистые и низколегированные стали для производства труб, стойкие к сероводородному коррозионному растрескиванию

Сталь	Страна	Состав	Термообработка	Показатели
Углеродистые стали типа 1010–1045	США, ASTM	0,10–0,45 % C; ≤1,65 % Mn	После нормализации и высокого отпуска	$\sigma_T = 240 \dots 300$ МПа
Диллиналь 50/36	Франция	≤0,18 % C; 0,5 % Si; 1,5 % Mn; 0,6 % Ni; 0,06 % Al; 0,025 % S; 0,025 % P	Нормализация	$\sigma_T \geq 350$ МПа; $\sigma_b \geq 500$ МПа; $\delta \geq 30$ %; $\psi \geq 60$ %; KCU ≥ 100 Дж/см ²
Nippon steel	Япония	<0,05 % C; <0,3 % Cu; <2 % Si; добавки Ti, Zr, Nb, V; 1,5 % Mo	Закалка, высокий отпуск	$\sigma_T = 320$ МПа; $\sigma_b = 510$ МПа; $\delta = 37$ %
Nippon Kokan	Япония	0,15 % C; 0,21 % Si; 1,1 % Mn; 0,016 % P; 0,0025 % S; 0,28 % Cu; 0,034 % V; 0,003 % Ca; 0,5 % Ni	Нормализация, закалка, высокий отпуск	$\sigma_T = 348 \dots 477$ МПа, явление блистеринга отсутствует; $\sigma_n = 0,65$ и $0,90 \sigma_T$
Низколегированная сталь	Италия	0,08 % C; 1,65 % Mn; 0,03 % Si; 0,015 % P; 0,0025 % S; 0,05 % Al; 0,05 % Nb; 0,06 % V; 0,04 % Ca	Прокатка, ускоренное охлаждение, отпуск	$\sigma_T = 440 \dots 510$ МПа; $\sigma_b = 560 \dots 688$ МПа; $\delta > 20$ %; $\sigma_n \geq 0,75 \sigma_T$, явление блистеринга отсутствует
Низколегированные стали трех категорий прочности: I – $\sigma_T \geq 240$; II – $\sigma_T \geq 320$; III – $\sigma_T \geq 400$	Россия	Сталь 20ЮЧ категории прочности I получена модифицированием углеродистой стали 0,2 % С алюминием и редкоземельными элементами цериевой группы. Стали 09ХГ2НАБЧ и 09ХГ2НАБЧД категории прочности II и III групп легированы никелем, что обеспечивает вязкость ферритной матрицы; добавка меди ослабляет коррозионные процессы на поверхности стали и препятствует проникновению водорода в металл	Категория прочности I: $\sigma_T = 230 \dots 410$ МПа, $\sigma_b = 440 \dots 560$ МПа, стойкость в H ₂ S при нагрузке 0,8 σ_T 475–720 ч листа 22 × 100 мм, до 435 ч трубы диаметром 426 мм. Категория прочности II: $\sigma_T \geq 370$ МПа, $\sigma_b = 650$ МПа, стойкость в H ₂ S при нагрузке 0,8 $\sigma_T > 500$ ч листа 65 мм. Категория прочности III: $\sigma_T \geq 410$ МПа, $\sigma_b \geq 660$ МПа, стойкость в H ₂ S при нагрузке 0,8 $\sigma_T > 325$ ч листа 65 мм	

Таблица 2
Легированные конструкционные стали, стойкие к сероводородному коррозионному растрескиванию

Сталь	Страна	Состав	Термообработка	Показатели
C-75	США	0,4 % C; 0,5 % Si; 1,9 % Mn; 1,0 % Cr; 0,3 % Mo	Закалка, высокий отпуск	$\sigma_{0,2} \geq 500$ МПа; $\sigma_b > 600$ МПа; $\delta > 16$ %
SM-80S, SM-90S, SM-95S	Япония	0,25–0,30 % C; 0,15–0,35 % Si; 0,30–0,90 % Mn; 0,90–1,20 % Cr; 0,3–0,60 % Mo; $\leq 0,026$ % P; $\leq 0,015$ % S	Термолучшение, закалка на мартенсит	$\sigma_T \geq 551 \dots 758$ МПа при парциальном давлении сероводорода не выше 0,01 МПа, при парциальном давлении сероводорода выше 0,01 МПа количество серы и фосфора в сталях снижают до $< 0,005$ % и $< 0,0015$ % соответственно, $\sigma_T \geq 0,85 \sigma_T$
C-95UH1 C-95UH2	Франция	0,3 % C; 0,2 % Si; 0,7 % Mn; 1,1 % Cr; 0,25 % Mo; $\leq 0,02$ % S; $\leq 0,025$ % P	Закалка, высокий отпуск	$\sigma_{0,2} = 665 \dots 770$ МПа; $\sigma_b > 735$ МПа; $\delta > 25$ %; $\sigma_T \geq 0,9 \sigma_{0,2}$
D95-SG	Италия	0,34 % C; 0,35 % Si; 1,2 % Mn; $< 1,6$ % Cr; $< 0,6$ % Mo; $\leq 0,015$ % S; $\leq 0,025$ % P; $\leq 0,1$ % V; обраб. кальцием	Закалка, высокий отпуск	$\sigma_{0,2} = 560 \dots 770$ МПа; $\sigma_T \geq 0,75 \sigma_{0,2}$
MW-C-90S (95S)	Германия	0,25–0,3 % C; 0,15–0,35 % Si; 0,8–1,05 % Mn; 1,1 % Cr; 0,3–0,5 % Mo; $\leq 0,005$ % S; $\leq 0,015$ % P; $\leq 0,35$ Cu	Закалка, высокий отпуск	$\sigma_T \geq 630 \dots 665$ МПа
три категории прочности: 18X1ГМФА, 28X2МФБД, 20X2МФА	Россия	0,16–0,24 % C; 0,17–0,37 % Si; 0,8–1,05 % Mn; 1,0–1,7 % Cr; 0,15–0,5 % Mo; $\leq 0,015$ % S; $\leq 0,02$ % P; $\leq 0,03$ –0,12 V; $\leq 0,3$ –0,6 Cu	Закалка, высокий отпуск	Три категории прочности: $\sigma_{0,2} > 549$ МПа, $\sigma_{0,2} > 657$ МПа, $\sigma_{0,2} > 637$ МПа, стойкость 720 ч, $\sigma_T \geq 0,8 \dots 0,85 \sigma_{0,2}$
SM-9CR	Япония	$< 0,15$ % C; $< 0,1$ % Si; $< 0,6$ % Mn; 8–10 % Cr; 0,9–1,1 % Mo; $\leq 0,015$ % S; $\leq 0,028$ % P	Термолучшение	$\sigma_{0,2} = 515 \dots 758$ МПа; $\sigma_b > 655$ МПа; $\delta > 20$ %
SM-25CR	Япония	$< 0,03$ % C; 0,75 % Si; 1,1 % Mn; 24–26 % Cr; 2,5–3,5 % Mo; $\leq 0,03$ % S; $\leq 0,03$ % P; 0,2–0,8 % Cu	Термолучшение	$\sigma_{0,2} = 688 \dots 1102$ МПа; $\sigma_b > 861$ МПа; $\delta > 11$ %
03X22H6M2, 03X25H5AM3	Россия	20–27 % Cr; 20–45 % Ni; 2,5–4,0 % Mo	Термолучшение	$\sigma_{0,2} = 485 \dots 590$ МПа; $\sigma_b > 792$ МПа; $\delta > 9$ %; $\sigma_T \geq 0,8 \sigma_{0,2}$

Основная часть

Технологический прием, повышающий эффективность механической обработки легированных коррозионных сталей, – это внедрение лезвийного инструмента с новыми пластинами из сплава Osprey® CE (марок CE7F, CE9F), состоящими из бинарного заэвтектического соединения Si–Al и имеющими контролируемое, выбираемое расширение (коэффициент расширения $5...17 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$), низкую плотность ($<2,5 \text{ г/см}^3$), высокую теплопроводность ($120...180 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$), высокую удельную жесткость ($39 \dots 54 \text{ кН}\cdot\text{м/кг}$), что позволяет пластинам не деформироваться при обработке, а также твердость 60–230 НВ, предел текучести 110–150 МПа, малый вес. Материал легкообрабатываемый, свариваемый и гальванический [3].

Для оснащения лезвийного инструмента пластинами из сплава Osprey® CE предлагается комплектовать их набором компоновки с различными свойствами: низкой теплопроводностью, высокой твердостью, низкой плотностью, высоким расширением (рис. 1,а). Для резцов набор компоновки пластин был измельчен в барабане, смешивался с глиноземом и добавками наноразмерных порошков Ti (C, N) – 40 % (по массе), Zr – 5 % (по массе) – для повышения трещиностойкости, твердости, износостойкости; прессовался, спекался при $T = 1700^\circ\text{C}$ (рис. 1,б). Получаемые пластины мелкозернистые, однородные. Для торцовых фрез использовалась компоновка из 6 пластин с комбинированием разных свойств.

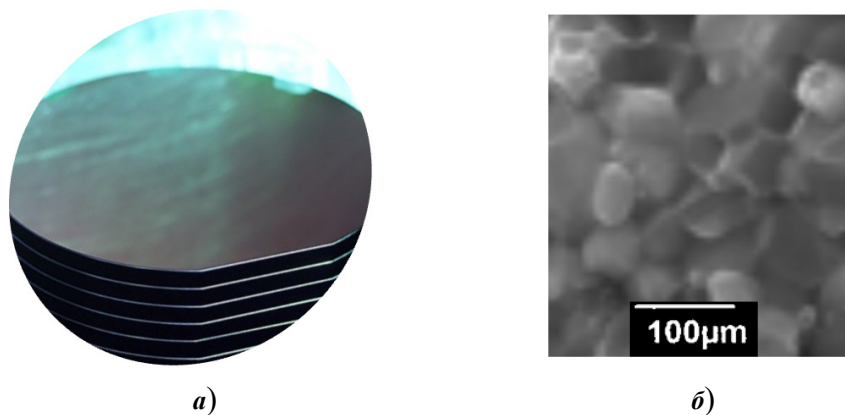


Рис. 1. Сплав Osprey® CE с добавками Ti (C, N), Zr:
а – пластины; б – фрактограмма микроструктуры

Сравнение свойств полученных пластин из сплава Osprey® CE (марок CE7F, CE9F) с другими режущими материалами представлено на рис. 2.

При высокой температуре в зоне резания растворимость Si в Al или Al в Si пластин сплава Osprey® CE не происходит из-за гомогенности расплава. Независимо от содержания Al (до 85 %) и Si (до 40 %) фазы непрерывные, что делает состав дулексным сплавом. Фаза Si дает жесткость, низкое тепловое расширение, невысокие внутренние напряжения, фаза Al повышает теплопроводность, ударную вязкость. При увеличении содержания Al в сплаве электропроводность, теплопроводность, прочность, ударная вязкость,

коэффициент температурного расширения и обрабатываемость увеличиваются. По этим причинам при обработке высоколегированных коррозионных сталей лучше всего выбирать сплав с самым высоким содержанием Al. При увеличении содержания Si сплав становится хрупким, поэтому для режущих пластин рекомендуется использовать марки CE7F, CE5F (Si до 40 %).



Рис. 2. Сравнение свойств сплава Osprey® CE с существующими режущими материалами

При внедрении нового сплава в промышленное производство необходимо комплексное исследование возможностей материала и прогнозирование обрабатываемости. Входные параметры (обрабатываемый и инструментальный материал, геометрические параметры инструмента и детали, скорость резания, подача, глубина резания, смазочно-охлаждающие технологические средства), выходные параметры (мощность резания, режимы резания), критерии обрабатываемости (удельная энергия резания, стойкость, износ, шероховатость, радиус закругления вершин) режущими пластинами сплава Osprey® CE при обработке легированных коррозионностойких сталей приведены на рис. 3.

Традиционная обработка легированных и высоколегированных коррозионных сталей, имеющих в своем составе Ni, Cr, Co, Mo, происходит под воздействием высоких температур в зоне резания: так материал размягчается и обрабатывается в небольшой период времени с меньшими силами резания. Однако высокая температура переходит на режущую кромку инструмента из любого материала (твердого сплава, нитрида бора, керамики), что приводит к снижению его прочности, твердости, износостойкости.

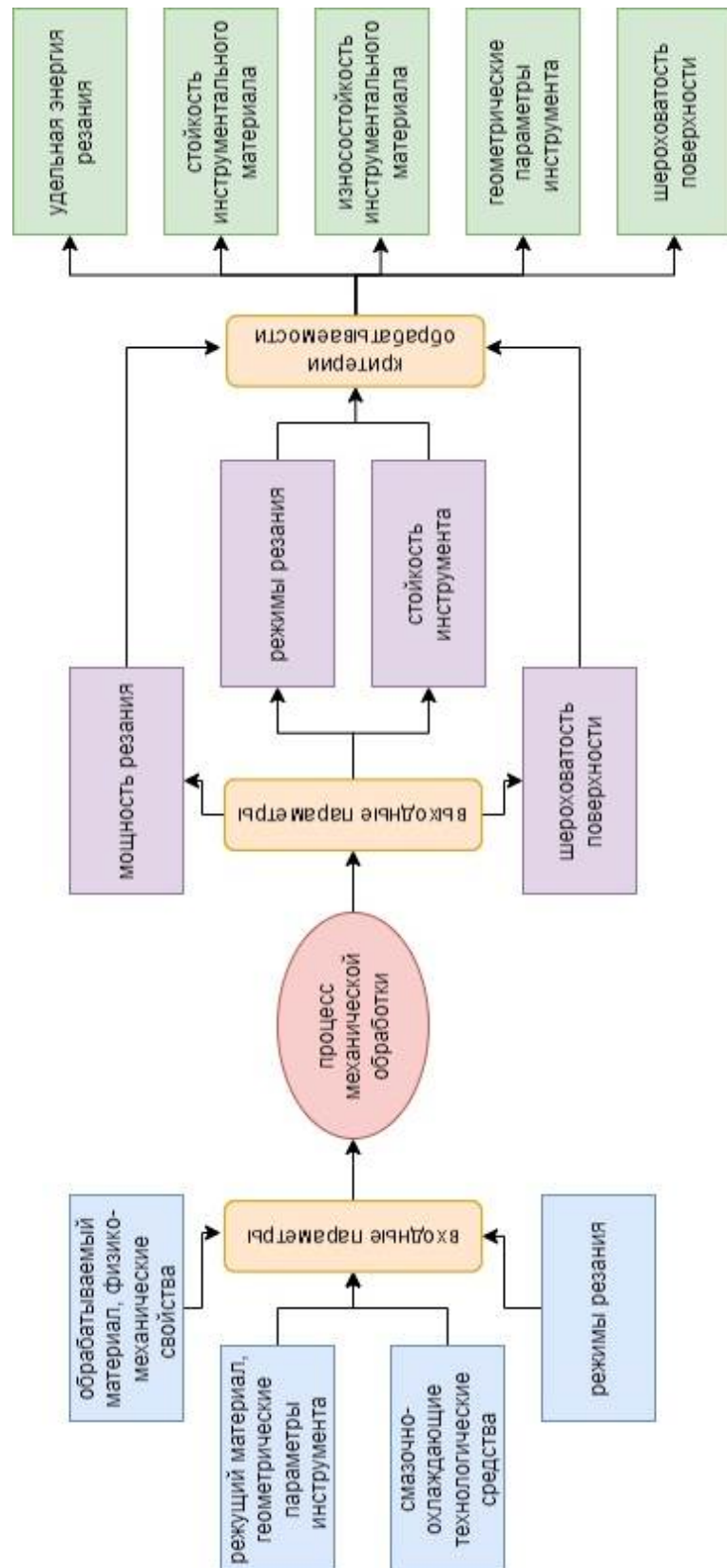


Рис. 3. Параметры процесса механической обработки

Экспериментально установлено, что сиалоновые керамические пластины (SiAlON, марки CC6160, CC6060, CC6165) менее подвержены повышению температуры, поэтому используются при высокоскоростной черновой и получистовой обработке сталей Inconel 718 HRC 38–46 с сохранением твердости и прочности со следующими режимами резания: при точении $V_{рез} = 200–300$ м/мин, $t = 2...3$ мм, $s = 0,1...0,2$ мм/об, смазочно-охлаждающая жидкость (СОЖ); при фрезеровании $V_{рез} = 700–1000$ м/мин, $t = 2$ мм, $s = 0,07...0,11$ мм/зуб, без СОЖ, ширина фрезерования $>70\%$, критерий стойкости пластин – износ 1 мм по задней поверхности.

Результаты экспериментального сравнения твердости режущих пластин из сиалоновой керамики, сплава Osprey® CE и твердого сплава при обработке высоколегированной коррозионной стали 03X22H6M2 представлены на рис. 4. В высокотемпературной области происходит меньшее падение твердости у инструментального сплава Osprey® CE.

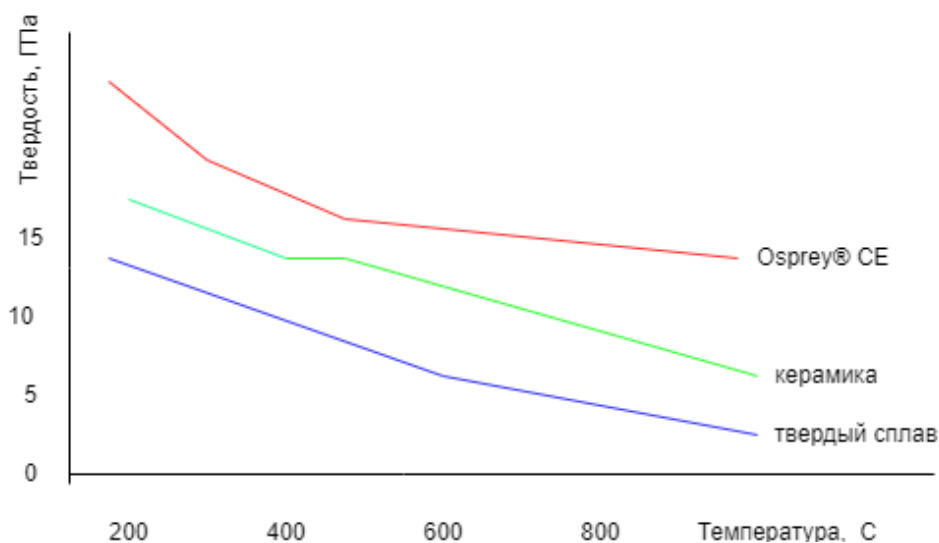


Рис. 4. Сравнение твердости инструментальных материалов

Рекомендуемые режимы резания при получистовой обработке 03X22H6M2 представлены в табл. 3.

Результаты экспериментальных исследований показали, что новый инструментальный сплав Osprey® CE химически стабилен к Ni, Co, Cr. При обработке стали с твердостью 35–50 HRC со скоростью обработки 1200 м/мин при температуре в зоне резания 1300–1400 °C возникает диффузионный износ пластины. Данные по износу режущей поверхности круглой пластины Osprey® CE при торцевом фрезеровании пластины 200×50 мм 03X22H6M2 с параметрами $V_{рез} = 360$ м/мин, $s = 0,02$ мм/об, $t = 0,1$ мм приведены в табл. 4.

Анализ результатов износа пластин подтверждает, что при увеличенном износе возникают вибрации и работать не рекомендуется. В нормальный период износа процесс резания стабильный, режущая кромка пластины изнашивается при точении равномерно. При фрезеровании было замечено, что в резании участвуют все зубья фрезы, но пластины более мягкие и менее плотные, изнашиваются быстрее, что приводит к неравномерному износу фрезы и сказывается на качестве обрабатываемой поверхности.

Таблица 3
Рекомендуемая скорость резания при получистовой обработке

Материал	Точение			Фрезерование				Шероховатость, мкм
	Скорость резания, м/мин	Охлажд-е	Стойкость режущей кромки, мин	Скорость съема материала, см³/мин	Скорость резания, м/мин	Подача, мм/зуб	Охлажд-е	Скорость съема материала, см³/мин
ТТ10К8-Б	30–60, $t = 2,5$ мм, $s = 0,2$ мм/об	Да	10	25	30–60	0,71, $t = 0,7$ мм	Да	20
Керамика СС6060, круглые вставки	275, $t = 2,5$ мм, $s = 0,25$ мм/об	нет	5	172	800	0,03, $t = 1,5$ мм	Нет	130
КБН	250–300	Да			150–370	0,05–0,08	Да/нет	$Ra < 1$
Osprey® CE	500–600, $t = 0,1$ мм, $s = 0,1$ мм/об	Да	8	190	250–300	До 0,1	нет	120
Osprey® CE Inconel 718 HRC 38–46	200–350, $t = 2–3$ мм, $s = 0,1–0,2$ мм/об	да	8	200	600–1000	0,07–0,1	Нет	140
								$Ra = 1$. Пластина без задних углов, передний угол отрицательный

Таблица 4

Данные по износу режущей поверхности круглой пластины Osprey® CE

Износ, мм	0,05	0,1	0,13	0,15	0,17
Время, мин	20	40	60	80	100

Обработка одинаковой детали при замене резца из твердого сплава на керамический CC6060 или на сплав Osprey® CE показала, что время обработки одной детали сократилось на 18–20 % и 24–25 % соответственно, общее количество инструментов уменьшилось на 42 шт. и 18 шт. соответственно. Смена инструментов при фрезеровании на керамические показала снижение времени обработки на 15 %, увеличение режимов резания на 30–32 % и повышение производительности труда на 40 %. Снижение скорости съема материала при использовании сплава Osprey® CE указывает на то, что необходима оптимизация подбора пластин.

Применение такого технологического приема, как тангенциальные ультразвуковые колебания (УЗК) инструмента с пластинами Osprey® CE (амплитуда 30–50 мкм, частота 30–40 кГц), при точении и фрезеровании позволило снизить уровень шума на 50 дБ, шероховатость поверхности Ra до 0,4–0,6 мкм; благодаря уменьшению упругих деформаций режущего инструмента и детали удалось повысить стойкость инструмента на 30 %, уменьшить температуру в зоне резания за счет того, что режущий инструмент отделялся от стружки в каждом цикле ультразвуковых колебаний и прерывистый контакт приводил к снижению теплопроводности инструмента и детали. При точении и фрезеровании инструментом, имеющим пластины Osprey® CE, с УЗК при росте амплитуды и частоты колебаний на 15–20 % и скорости резания на 18–25 % повысилась производительность на 10–15 %, уменьшилась шероховатость поверхности до $Ra = 0,32$ мкм, а точность обработки до 0,08–0,1 мм. При этом увеличился износ прямоугольных пластин Osprey® CE в 3–4 раза по сравнению с механической обработкой без УЗК. Приведенные результаты позволили рекомендовать использование инструментов с круглой пластиной Osprey® CE при наложении УЗК.

При точении применение смазочно-охлаждающих технологических средств становится проблематичным из-за условий загрязнения окружающей среды. При исследовании процесса механической обработки коррозионно-стойких сплавов был предложен технологический прием – введение минимального количества смазки с контролируемой подачей 50–80 мл/г биоразлагаемого синтетического масляного эфира, распыляемого на режущую кромку инструмента сжатым воздухом под высоким давлением и с высокой скоростью. Результаты работы показали, что такой прием снижает температуру в зоне контакта инструмента и детали на 30 %.

Экспериментальными исследованиями доказано, что применение технологических приемов (режущие инструменты с прогрессивной пластиной Osprey® CE, минимальное количество смазки, тангенциальные ультразвуковые колебания, оптимизация режимов) позволяют существенно повысить эффективность процесса механической обработки коррозионно-стойких сталей.

После механической обработки стали подвергались испытаниям на коррозионное растрескивание: при постоянной деформации образца; при постоянной одноосной нагрузке; при постоянной скорости принудительного

деформирования металлов. В качестве агрессивных сред для испытаний на коррозионное растрескивание использовался 40 % раствор $MgCl_2$. Эксперименты проводились на сталях 03X22H6M2 (Россия) и Inconel 718 (США) после точения и фрезерования инструментом из сплава Osprey® CE, 12X18H9 (Россия) после токарной обработки резцом с пластиной Osprey® CE (см. рис. 1).

Исследование температурных границ хлоридного коррозионного растрескивания показало, что оно заметно ускоряется с повышением температуры до 150–200 °С, затем замедляется при 300–350 °С. Нижняя граница возникновения хлоридного коррозионного растрескивания Inconel 718 наступает при 50–56 °С. С ростом растягивающих напряжений хлоридное коррозионное растрескивание в сталях увеличивается, время стойкости к коррозионному растрескиванию снижается. Экспериментально установлено, что термообработанные стали 03X22H6M2, 12X18H9, функционирующие в агрессивной среде с повышенной концентрацией хлоридов и при наличии остаточных напряжений 200–210 МПа работоспособны до разрушения 1200 ч, при снижении нагрузки до 100–120 МПа время до разрушения увеличивается на 30–34 %. У всех исследуемых сталей с повышением степени холодной деформации на 15–25 % снижается стойкость к коррозионному растрескиванию. Механическая обработка инструментом с режущими пластинами Osprey® CE, при которой в детали остаются сжимающие остаточные напряжения, повышает стойкость к коррозионному растрескиванию на 20–30 %. Снятие наклепанного слоя травлением повышает стойкость к хлоридному коррозионному растрескиванию до 15–20 %.

Заключение

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования, направленные на повышение эффективности механической обработки легированных коррозионностойких сталей, работающих в агрессивных средах, позволили сделать следующие выводы.

1. Для повышения стойкости к коррозионному растрескиванию сталь должна соответствовать следующим требованиям:

- низколегированные стали – состав: 0,2 % С, 1,5 % Cr, 0,2 % Мо, феррито-перлитная структура; твердость HRC ≥ 22 ; предел текучести 240–400 МПа;
- легированные стали – сорбитная структура, твердость HRC ≥ 27 , предел текучести 500–800 МПа;
- высоколегированные коррозионные стали – 9–13 % Cr мартенситного класса, 25 % Cr с прочностью $\sigma_{0,2}$ до 1100 МПа феррито-аустенитного класса;
- сплавы на никелевой основе, легированные хромом до 26 % и молибденом до 7 %. Упрочнение данных сплавов достигается за счет дисперсионного твердения и холодной пластической деформации.

2. В работе предложены следующие технологические приемы:

- режущие инструменты с прогрессивной пластиной Osprey® CE;
- минимальное количество смазки с контролируемой подачей 50–80 мл/г биоразлагаемого синтетического масляного эфира, распыляемого на режущую кромку резца сжатым воздухом под высоким давлением и с высокой скоростью;

– механическая обработка инструментом с круглыми пластинами Osprey® SE и наложением тангенциальных ультразвуковых колебаний.

Экспериментальными исследованиями доказано, что применение этих технологических приемов и оптимизация режимов позволяют существенно повысить эффективность процесса механической обработки коррозионно-стойких сталей: сократить время на обработку до 25 %, увеличить стойкость режущей кромки на 12–14 % и скорость съема материала на 15 %.

3. Исследования износа инструментов показали, что в нормальный период износа процесс резания является стабильным, режущая кромка пластины Osprey® SE изнашивается равномерно. При фрезеровании в резании участвуют все зубья фрезы, но пластины более мягкие и менее плотные, изнашиваются быстрее, что приводит к неравномерному износу фрезы и сказывается на качестве обрабатываемой поверхности. Поэтому данный инструмент рекомендуется использовать только для получистового фрезерования.

4. Экспериментально установлено, что термообработанные стали 03X22H6M2, 12X18H9, функционирующие в агрессивной среде с повышенной концентрацией хлоридов и при наличии остаточных напряжений 200–210 МПа работоспособны до разрушения 1200 ч, при снижении нагрузки до 100–120 МПа время до разрушения увеличивается на 30–34 %.

Список литературы

1. Worldsteel. URL: <https://worldsteel.org/>
2. Перспективные направления применения стали // Ассоциация «Русская Сталь». URL: <https://russtal.ru/>
3. Sandvik Group. URL: <https://www.sandvik.com>

References

1. *Worldsteel*. Available at: <https://worldsteel.org/>
2. Promising areas of steel application. *Assotsiatsiya «Russkaya Stal'» = Association "Russian Steel"*. (In Russ.). Available at: <https://russtal.ru/>
3. *Sandvik Group*. Available at: <https://www.sandvik.com>

Информация об авторах / Information about the authors

Татьяна Николаевна Иванова

доктор технических наук, профессор,
старший научный сотрудник отдела
моделирования и синтеза
технологических структур, Удмуртский
федеральный исследовательский центр
Уральского отделения Российской
академии наук (Россия, г. Ижевск,
ул. им. Татьяны Барамзиной, 34);
профессор кафедры автоматизации
информационных и инженерных
технологий, Чайковский филиал
Пермского национального
исследовательского политехнического
университета (Россия, г. Чайковский,
Пермский край, ул. Ленина, 73)

E-mail: rsg078829@mail.ru

Tat'yana N. Ivanova

Doctor of engineering sciences, professor,
senior staff scientist of the department
of modeling and synthesis of technological
structures, Udmurt Federal Research Center
of Ural branch of the Russian Academy
of Sciences (34 Tatyany Baramzinoy
street, Izhevsk, Russia);
professor of the sub-department
of automation of information
and engineering technologies,
Tchaikovsky branch of the Perm National
Research Polytechnic University
(73 Lenina street, Tchaikovsky, Perm
Region, Russia)

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 12.10.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 05.11.2024

Принята к публикации / Accepted 27.11.2024