

УДК 621.787.4

doi: 10.18698/0536-1044-2023-7-54-63

Влияние маятникового поверхностного пластического деформирования на коррозионную стойкость деталей машин

С.А. Зайдес, Минь Куан Хо

Иркутский национальный исследовательский технический университет

Influence of the pendulum surface plastic deformation on the machine part corrosion resistance

S.A. Zaides, Minh Quan Ho

Irkutsk National Research Technical University

С помощью весового метода определения коррозии установлено влияние технологических параметров и режимов маятникового поверхностного пластического деформирования на коррозионную стойкость упрочненных деталей. Для оценки коррозии, источником которой служила серная кислота с концентрацией 15 %, использован массовый показатель. Анализ данных экспериментальных исследований показал, что коррозионная стойкость упрочненных деталей во многом зависит от шероховатости их поверхностей. Построена корреляционная зависимость коррозионной стойкости от шероховатости. На основании результатов множественного регрессионного анализа получены эмпирические уравнения для оптимизации коррозионной стойкости деталей, упрочненных маятниковым поверхностным пластическим деформированием. Установлены оптимальные режимы маятникового поверхностного пластического деформирования, обеспечивающие максимальную коррозионную стойкость упрочненных деталей: частота вращения заготовки — 80...100 мин⁻¹; частота маятникового движения рабочего инструмента — 40...55 дв. ход/мин; радиальный натяг — 0,1 мм; продольная подача — 0,07...0,11 мм/об; угол поворота рабочего инструмента — 15...20°.

Ключевые слова: интенсивность коррозии, агрессивная среда, поверхностное пластическое деформирование, режимы обработки, поверхностный слой

The paper uses the weight method in corrosion determination to establish technological parameters and modes of the pendulum surface plastic deformation of the hardened parts in regard to the corrosion resistance. The mass index was used to assess corrosion, which source was the sulfuric acid with the 15% concentration. Analysis of the experimental research data showed that corrosion resistance of the hardened parts largely depended on their surfaces roughness. Correlation dependence of the corrosion resistance on roughness was constructed. Based on the multiple regression analysis results, empirical equations were obtained to optimize corrosion resistance of the parts hardened by the pendulum surface plastic deformation. The following optimal modes of the pendulum surface plastic deformation were identified ensuring maximum corrosion resistance of the hardened parts: workpiece rotation frequency — 80...100 min⁻¹; pendulum motion frequency of the working tool — 40...55 strokes/min; radial interference — 0.1 mm; longitudinal feed — 0.07...0.11 mm/rev; working tool rotation angle — 15...20°.

Keywords: corrosion intensity, aggressive media, surface plastic deformation, machining modes, surface layer

Ежегодные потери металлов из-за коррозии составляют до 12 % общей массы металлофонда России, что соответствует утрате до 30 % ежегодно производимого металла. По оценкам специалистов различных стран, эти потери в промышленно развитых странах составляют 2...6 % валового национального продукта [1, 2].

Анализ литературных источников [3, 4] показал, что среди всех причин, приводящих к разрушению деталей при эксплуатации, 9...10 % приходится на разные виды коррозии. Поэтому в современном машиностроении постоянно ведется борьба с коррозией, направленная на увеличение срока службы металлических изделий и оборудования. Повышение коррозионной стойкости металлоизделий является важной задачей для инженеров и исследователей.

Поверхностное пластическое деформирование (ППД) изделия [5–7] относится к традиционным методам улучшения эксплуатационных свойств, в том числе и коррозионной стойкости. Различные методы ППД способствуют увеличению коррозионной стойкости детали благодаря уменьшению шероховатости поверхности и сглаживанию микронеровностей с устранением высоких вершин и глубоких впадин, которые являются источником сбора продуктов, вызывающих коррозию металла.

Сжимающие остаточные напряжения на поверхности детали, сформированные в результате упрочнения ППД, снижают интенсивность электрохимического растворения металла, тем самым повышая коррозионную стойкость изделия [7–9].

Однако в известных исследованиях [10–13] нет единого мнения о влиянии ППД на коррозионную стойкость упрочненных деталей, так как, с одной стороны, снижение параметров шероховатости и изменение формы микропрофиля повышают коррозионную стойкость, а с другой — неоднородность механических свойств структуры упрочненного слоя при наличии жидких сред приводит к появлению разности потенциалов, что вызывает интенсивное окисление металлов. Надо полагать, что каждый из указанных факторов проявляется по-разному в зависимости от условий и режимов механической обработки.

В Иркутском национальном исследовательском техническом университете ведутся работы по совершенствованию способов ППД на основе разработки более сложной кинематики ра-

бочего инструмента (РИ) [14, 15]. Предлагаемый способ ППД основан на маятниковом движении деформирующего РИ, который последовательно реализует процессы качения и скольжения.

Результаты исследования эффективности такого способа с точки зрения увеличения интенсивности напряжений в очаге деформации без повышения радиального натяга и остаточных напряжений в упрочненных деталях приведены в работах [15, 16]. При этом особый практический интерес представляет влияние маятникового ППД на коррозионную стойкость упрочненных деталей, которые достаточно широко применяются на нефтехимических предприятиях, горнодобывающих производствах, в машинах и механизмах сельскохозяйственного назначения.

Цель работы — установить закономерность влияния технологических параметров и режимов маятникового ППД на коррозионную стойкость упрочненных деталей.

Методика и оборудование для эксперимента.

Для наглядного представления принципа работы предлагаемого маятникового ППД на рис. 1, а приведена кинематическая схема этого процесса. В качестве РИ использован круговой сектор 3 с деформирующим элементом в виде радиуса скругления 2.

Особенность новой кинематики деформирующего РИ заключается в том, что ППД осуществляется за счет чередования двух механических процессов — качения и скольжения РИ. При движении РИ и заготовки 1 в противоположных направлениях происходит плавное качение (рис. 1, б), при их движении в одном направлении — интенсивное скольжение (рис. 1, в).

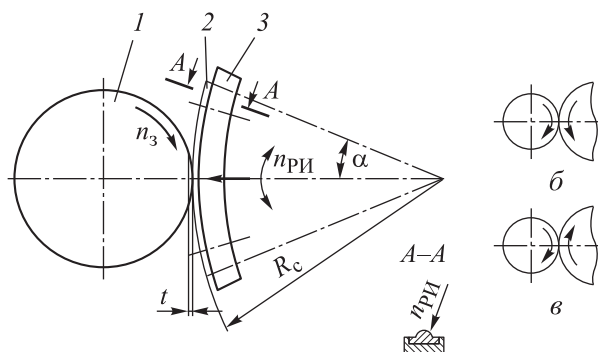


Рис. 1. Схемы маятникового ППД: а — кинематическая; б и в — качения и скольжения в зоне контакта заготовки и РИ

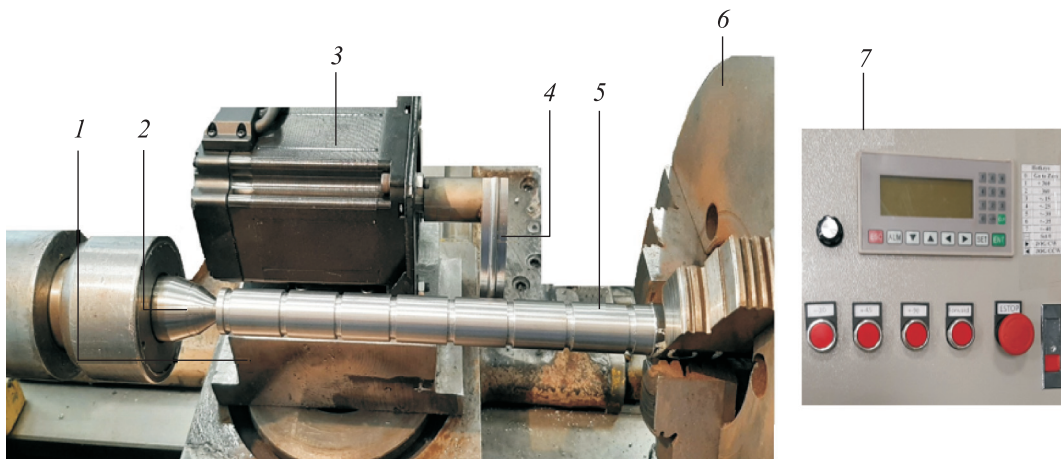


Рис. 2. Внешний вид устройства для маятникового ППД наружных поверхностей цилиндрической детали:
1 — основание; 2 — задний центр; 3 — мотор-редуктор; 4 — секториальный РИ; 5 — обрабатываемый образец;
6 — трехкулачковый патрон; 7 — панель управления параметрами движения РИ

Кроме преимущества такого способа в способности реализации двух указанных процессов, криволинейная форма РИ по сравнению с прямолинейной [17] обеспечивает повышение давления в зоне деформации за счет снижения площади контакта.

Экспериментальные исследования проводили на токарном станке 1К62, где вместо верхней части суппорта устанавливали устройство для создания маятникового движения секториального РИ (рис. 2). Геометрические характеристики РИ: секториальный радиус $R_c = 65$ мм; рабочий радиус $r_{РИ} = 3$ мм. Материал РИ — быстрорежущая сталь Р18. В качестве технологической смазки использовали промышленное масло И-40А, широко применяемое при обработке деталей ППД.

Величину коррозионного растворения металла можно найти следующими основными методами: по изменению параметров исследуемого образца — массы, механических свойств при растяжении и электрического сопротивления металла; по определению времени до появления первого коррозионного центра [18, 19].

Методика коррозионных испытаний. Для оценки коррозионной стойкости упрочненных образцов использовали метод, основанный на изменении их массы под воздействием коррозионной среды. Метод достаточно прост, надежен, позволяет получать устойчивые результаты и количественно оценивать массу металла, разрушенную коррозией [19].

После маятникового ППД цилиндрические образцы разрезали на диски толщиной 8 мм

с помощью металлографического отрезного станка Discotom-10. Для определения интенсивности коррозии торцевые части цилиндрических дисков покрывали нитролаком, подвергая такому разрушению только наружную цилиндрическую поверхность образца.

В качестве источника коррозии выступала серная кислота (H_2SO_4) с концентрацией 15 %, которая обладает достаточно высокой коррозионной активностью среди известных кислот и является универсальным средством, вызывающим коррозию практически всех металлов.

Образцы погружали в эксикатор с раствором серной кислоты при комнатной температуре с фиксированием времени испытания. Для оценки коррозионного разрушения использовали массовый показатель, представляющий собой количество растворенного металла, отнесенное к площади исследуемой поверхности [19]:

$$K_p = \frac{Q_0 - Q_1}{A}$$

Здесь Q_0 и Q_1 — масса образца до и после коррозионного воздействия; A — площадь, подвергаемая коррозии,

$$A = l_d \pi D_s,$$

где l_d и D_s — толщина и диаметр цилиндрического диска.

Измерения массы образцов, подвергаемых коррозионному воздействию в агрессивной среде, проводили периодически (каждый час) с помощью аналитических весов HR-150AR с точностью измерения до 0,0001 г (рис. 3).



Рис. 3. Фрагмент измерения массы образца на аналитических весах HR-150AR:
1 — платформа с образцом; 2 — экран с результатами измерения

Методика измерения шероховатости. Чтобы найти связь между шероховатостью и коррозионной стойкостью поверхностей, упрочненных маятниковым ППД, необходимо экспериментально определить шероховатость образцов, подвергаемых коррозионным испытаниям.

Шероховатость цилиндрической поверхности измеряли профилометром Form Talysurf i200 производства компании Taylor Hobson. Шероховатость каждого участка оценивали по среднему арифметическому отклонению профиля R_a в трех зонах через 120° по окружности. Исходя из результатов средних значений по трем замерам, определяли зависимость шероховатости упрочненных поверхностей от каждого технологического параметра маятникового ППД.

Результаты коррозионных испытаний. Результаты коррозионных испытаний цилиндрических образцов из стали 45 в 15%-ном растворе серной кислоты приведены на рис. 4. Видно, что на поверхности упрочненного образца образуются газовые пузыри меньшего размера (рис. 4, б), чем на поверхности неупрочненного образца, что свидетельствует о более интенсивном коррозионном процессе.

Это можно объяснить тем, что образец до упрочнения имеет большую шероховатость поверхности со значительными размерами вершин и впадин (рис. 4, а), поэтому ее площадь контакта с коррозионной средой велика, а следовательно, процесс растворения металла происходит быстрее.

Результаты процесса коррозии также можно оценить визуально после нахождения образцов в растворе кислоты в течение 3 ч (рис. 4, в).

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что маятниковое ППД не только улучшает напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя и механические характеристики деталей машин, но и способствует повышению эксплуатационных свойств, одним из которых является коррозионная стойкость.

Результаты испытаний по определению интенсивности коррозии цилиндрических образцов до и после упрочнения маятниковым ППД показаны на рис. 5. Установлено, что наиболее интенсивный процесс коррозии происходит

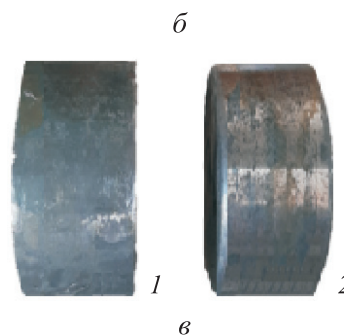
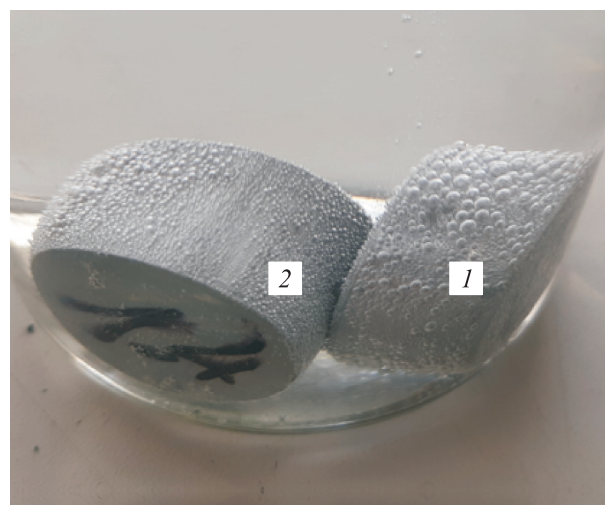
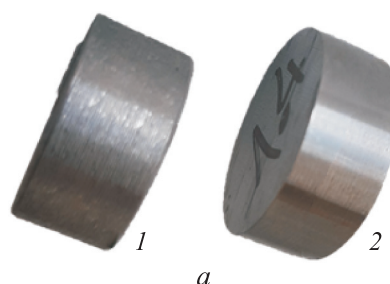


Рис. 4. Результаты коррозионных испытаний неупрочненных (1) и упрочненных маятниковым ППД (2) цилиндрических образцов из стали 45 в 15%-ном растворе серной кислоты:
а — до коррозии; б — в процессе коррозии;
в — после коррозии

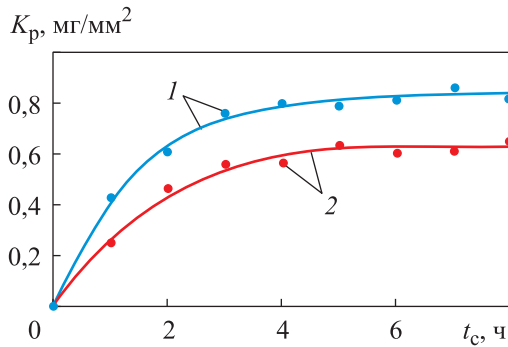


Рис. 5. Зависимости массового показателя коррозионного разрушения K_p неупрочненных (1) и упрочненных (2) цилиндрических образцов из стали 45 от времени коррозионных испытаний t_c в 15%-ном растворе серной кислоты

в приповерхностном слое упрочненных и неупрочненных образцов. После маятникового ППД интенсивность коррозии на поверхности цилиндра значительно снижается, массовый показатель K_p уменьшается на 25...35 %.

Установлено, что в течение первых 6 ч интенсивность коррозии поверхностного слоя образцов непрерывно увеличивается, максимального значения массовый показатель K_p достигает после 5–6 ч коррозионных испытаний. По истечении шести часов особого изменения массы образцов не наблюдалось. Поэтому чтобы установить влияние каждого технологического параметра маятникового ППД на величину коррозии упрочненных образцов из стали 45, использовали показатель K_p , рассчитанный по результатам определения растворенного металла после 6 ч их погружения в раствор серной кислоты.

Помимо экспериментальных точек на рис. 5 показаны сплошные кривые, соответствующие значениям массового показателя K_p , полученным в разное время от начала коррозии.

Исследуем влияние технологических параметров маятникового ППД на коррозионную стойкость упрочненных деталей. Экспериментальные зависимости массового показателя коррозии K_p и шероховатости поверхности Ra упрочненного образца от основных параметров маятникового ППД — продольной подачи РИ s , радиального натяга t и частоты вращения заготовки n_3 — приведены на рис. 6. Там же показаны аппроксимирующие зависимости (пунктирные линии), построенные по выражениям $K_p = -3,2s^2 + 1,7s + 0,5$ (рис. 6, а), $K_p = 17t^2 - 3,8t + 0,8$ (рис. 6, б) и $K_p = 0,1858n_3^{0,26}$ (рис. 6, в).

Анализ результатов коррозионных испытаний показал, что повышение продольной подачи РИ приводит к ускорению процесса коррозии: при увеличении s с 0,07 до 0,23 мм/об интенсивность коррозии возрастает на 15 % (см. рис. 6, а). При этом установлена прямая связь между шероховатостью поверхности детали и интенсивностью коррозии: чем меньше первая, тем ниже вторая.

Зависимость интенсивности коррозии от радиального натяга имеет неоднозначный характер. С повышением радиального натяга до 0,10 мм интенсивность коррозии снижается,

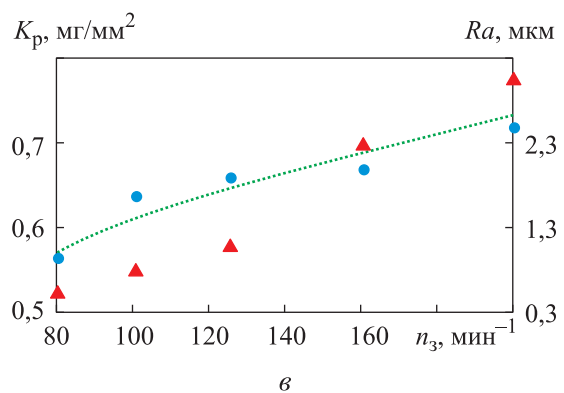
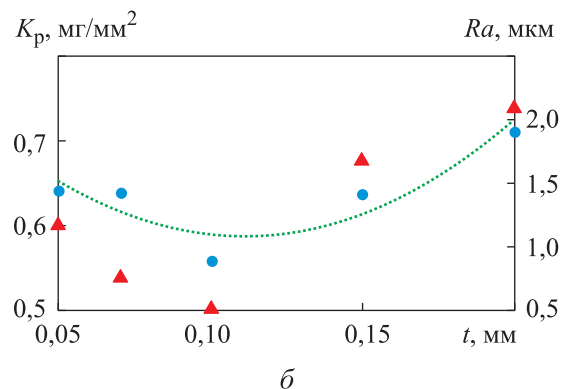
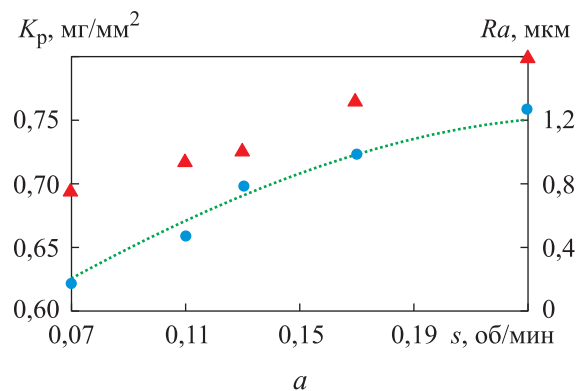


Рис. 6. Зависимости массового показателя коррозии K_p (●) и шероховатости поверхности Ra (▲) упрочненного образца от продольной подачи РИ s (а), радиального натяга t (б) и частоты вращения заготовки n_3 (в)

при этом его рациональное значение, обеспечивающее максимальную коррозионную стойкость упрочненных образцов, составляет 0,10...0,11 мм (см. рис. 6, б). Такому значению натяга соответствует наименьшая шероховатость упрочненной поверхности $Ra = 0,53$ мкм. При $t > 0,11$ мм интенсивность коррозии увеличивается, массовый показатель коррозии K_p возрастает от 0,56 до 0,72 мг/мм².

При обработке цилиндрических деталей маятниковым ППД с частотой вращения заготовки $n_z = 80...90$ мин⁻¹ наблюдается наименьшая интенсивность коррозии, массовый показатель коррозии K_p достигает 0,55...0,60 мг/мм². С повышением частоты вращения заготовки от 80 до 200 мин⁻¹ интенсивность коррозии увеличивается почти на 30 %.

Зависимости массового показателя коррозии K_p и шероховатости поверхности Ra упрочненного образца от параметров маятникового движения РИ — частоты $n_{РИ}$ и угла поворота α — приведены на рис. 7. Там же показаны аппроксимирующие зависимости (пунктирные линии), построенные по выражениям

$$K_p = 0,276n_{РИ}^{0,2} \quad (\text{рис. 7, а}) \quad \text{и} \quad K_p = 0,0039\alpha + 0,56 \quad (\text{рис. 7, б}).$$

Установлено, что при частоте маятникового движения РИ $n_{РИ} = 40...60$ дв. ход/мин интенсивность коррозии невелика. Увеличение параметра $n_{РИ}$ приводит к росту интенсивности коррозии упрочненной детали.

Интенсивность коррозии находится в прямой зависимости от угла поворота РИ. С его увеличением в заданных значениях массовый показатель коррозии K_p возрастает почти на 28 %. Рациональное значение угла поворота РИ, обеспечивающее наименьшую скорость коррозии, составляет 15...20° (см. рис. 7, б).

На основе анализа зависимостей массового показателя коррозии и шероховатости поверхности упрочненных образцов от технологических параметров маятникового ППД построена корреляционная зависимость между этими параметрами (рис. 8), определяемая выражением $K_p = 0,64Ra^{0,14}$ (коэффициент достоверности аппроксимации $R^2 = 0,98$). Пунктирная линия на рис. 8, полученная в результате построения экспериментальных точек, описывает математическую зависимость массового показателя коррозии K_p от шероховатости поверхности в интервале $Ra = 0,5...3,4$ мкм.

Вследствие неоднородности влияния технологических параметров маятникового ППД на массовый показатель коррозии упрочненных деталей возникает необходимость оптимизации режимов маятникового ППД, обеспечивающих максимальную коррозионную стойкость.

Для решения задачи оптимизации режимов маятникового ППД в качестве исходных данных использованы математические уравнения, полученные при экспериментальных исследованиях коррозионного процесса (см. рис. 6 и 7).

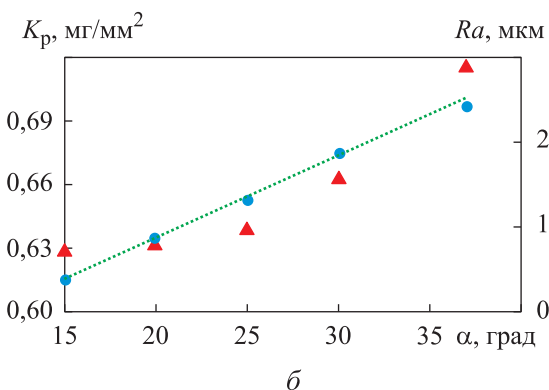
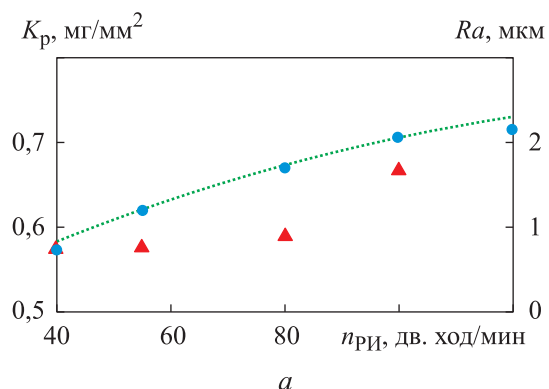


Рис. 7. Зависимости массового показателя коррозии K_p (●) и шероховатости поверхности Ra (▲) упрочненного образца от частоты маятникового движения РИ $n_{РИ}$ (а) и угла поворота РИ α (б)

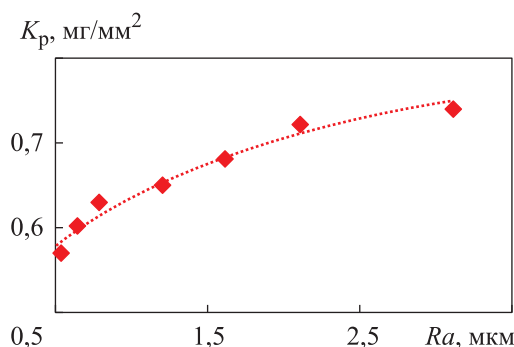


Рис. 8. Зависимость массового показателя коррозии K_p от шероховатости поверхности Ra упрочненного образца

По результатам множественного регрессионного анализа в программном пакете Statistica 10.1 получены следующие эмпирические уравнения для оптимизации коррозионной стойкости упрочненных деталей:

- при радиальном натяге $t \leq 0,1$ мм

$$K_p = 0,08s^{0,18}t^{-0,18}n_3^{0,3}n_{\text{РИ}}^{0,23}\alpha^{0,2}; \quad (1)$$

- при радиальном натяге $t > 0,1$ мм

$$K_p = 0,08s^{0,18}t^{0,12}n_3^{0,3}n_{\text{РИ}}^{0,23}\alpha^{0,2}. \quad (2)$$

Наличие двух уравнений (1) и (2) для оценки коррозионной стойкости упрочненных деталей обусловлено неоднозначным влиянием радиального натяга на эксплуатационное качество поверхностного слоя. Следует отметить, что из

всех технологических параметров маятникового ППД частота вращения заготовки является самым значимым параметром, с уменьшением которого коррозионная стойкость упрочненных деталей повышается.

В качестве примера на рис. 9 приведены результаты определения оптимальных режимов маятникового ППД, обеспечивающих максимальную коррозионную стойкость деталей.

По данным регрессионного анализа установлено, что максимальную коррозионную стойкость деталей, упрочненных маятниковым ППД, обеспечивают следующие оптимальные режимы обработки: $n_3 = 80 \dots 100 \text{ мин}^{-1}$; $n_{\text{РИ}} = 40 \dots 55 \text{ дв. ход/мин}$; $t = 0,1 \text{ мм}$; $s = 0,07 \dots 0,11 \text{ мм/об}$; $\alpha = 15 \dots 20^\circ$. При этом массовый

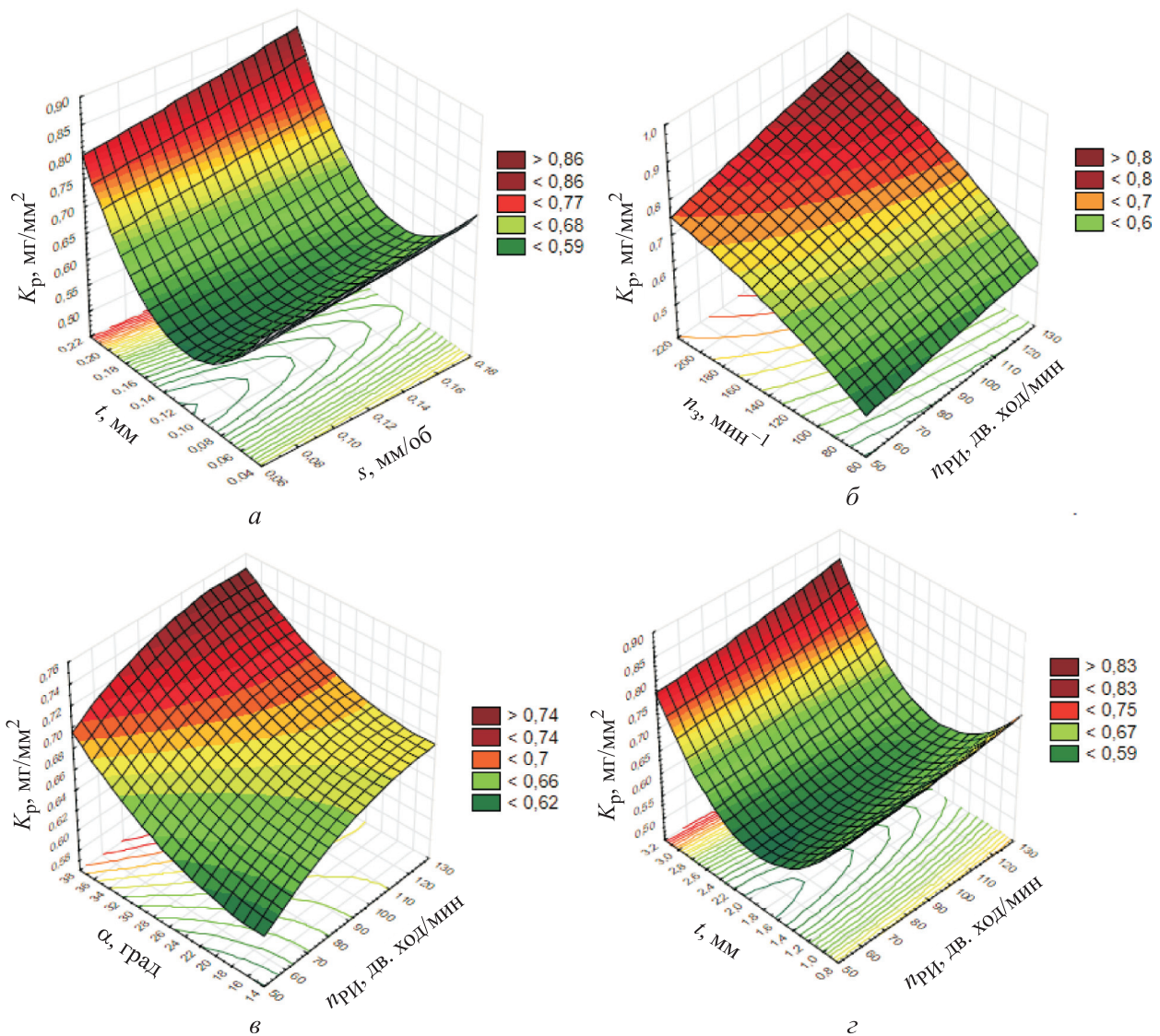


Рис. 9. Зависимости упрочненной поверхности образца от технологических параметров маятникового ППД: а — радиального натяга t и продольной подачи РИ s ; б — частоты маятникового движения РИ $n_{\text{РИ}}$ и частоты вращения заготовки n_3 ; в — угла поворота РИ α и частоты маятникового движения РИ $n_{\text{РИ}}$; г — радиального натяга t и частоты маятникового движения РИ $n_{\text{РИ}}$

показатель коррозии составляет 0,53...0,60 мг/мм², а коррозионная стойкость упрочненной детали становится больше на 30...35 %, чем у неупрочненной.

Таким образом, предлагаемый способ отделочно-упрочняющей обработки не только положительно сказывается на напряженно-деформированном состоянии и механических свойствах поверхностного слоя деталей машин, что показано в работах [11, 12], но и является эффективным средством повышения их коррозионной стойкости.

Выводы

1. Показано, что коррозионная стойкость детали после маятникового ППД становится

больше на 30...35 %, чем у детали без упрочнения. При этом массовый показатель коррозии составляет 0,53...0,60 мг/мм².

2. Установлено, что массовый показатель коррозии поверхности, упрочненной маятниковым ППД, и параметр шероховатости связаны выражением $K_p = 0,64Ra^{0,14}$ (коэффициент достоверности аппроксимации $R^2 = 0,98$).

3. Определены оптимальные режимы упрочнения детали маятниковым ППД, обеспечивающие ее максимальную коррозионную стойкость: частота вращения заготовки — 80...100 мин⁻¹; частота маятникового движения РИ — 40... 55 дв. ход/мин; радиальный натяг — 0,1 мм; продольная подача РИ — 0,07... 0,11 мм/об; угол поворота РИ — 15...20°.

Литература

- [1] Семенова И.В., Флорианович Г.М., Хорошилов А.В. *Коррозия и защита от коррозии*. Москва, Физматлит, 2006. 371 с.
- [2] Шевченко А.А. *Химическое сопротивление неметаллических материалов и защита от коррозии*. Москва, Химия, КолосС, 2006. 246 с.
- [3] Мак-Ивили А.Дж. *Анализ аварийных разрушений*. Москва, Техносфера, 2010. 413 с.
- [4] Кузнецов А.М., ред. *Расследование инцидентов и аварий на опасных производственных объектах*. Иркутск. Изд-во ИрГТУ, 2011. 272 с.
- [5] Лебедев В.А. *Эффективные технологии поверхностного пластического деформирования и комбинированной обработки*. Москва, Спектр, 2014. 402 с.
- [6] Biswas S., Alavi S.H., Sedai B. et al. Effect of ultrasonic vibration-assisted laser surface melting and texturing of Ti-6Al-4V ELI alloy on surface properties. *J. Mater. Sci. Technol.*, 2019, vol. 35, no. 2, pp. 295–302, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.09.057>
- [7] Li Y.B., Zhang Q.X., Qi L. et al. Improving austenitic stainless steel resistance spot weld quality using external magnetic field. *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2018, vol. 23, no. 7, pp. 619–627, doi: <https://doi.org/10.1080/13621718.2018.1443997>
- [8] Grzesik W., Rech J., Żak K. High-precision finishing hard steel surfaces using cutting, abrasive and burnishing operations. *Procedia Manuf.*, 2015, vol. 1, pp. 619–627, doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.048>
- [9] Roux J.D.L., Craig I.K. Requirements for estimating the volume of rocks and balls in a grinding mill. *IFAC-PapersOnLine*, 2017, vol. 50, no. 1, pp. 1169–1174, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.403>
- [10] Frihat M.H., Al Quran F.M.F., Al-Odat M.Q. Experimental investigation of the influence of burnishing parameters on surface roughness and hardness of brass alloy. *Material Sci. Eng.*, 2015, vol. 5, no. 1, art. 1000216, doi: <https://doi.org/10.4172/2169-0022.1000216>
- [11] Parasiz S.A., Kutucu Y.K., Karadag O. On the utilization of Sachs model in modeling deformation of surface grains for micro/meso scale deformation processes. *J. Manuf. Process.*, 2021, vol. 68-A, pp. 1086–1099, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.033>
- [12] Блюменштейн В.Ю., Смелянский В.М. *Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин*. Москва, Машиностроение, 2007. 399 с.
- [13] Ежелев А.В., Бобровский И.Н., Лукьянов А.А. Анализ способов обработки поверхностно-пластическим деформированием. *Фундаментальные исследования*, 2012, № 6–3, с. 642–646.
- [14] Зайдес С.А., Хо М.К. *Способ поверхностно-пластического деформирования наружной поверхности детали в виде тела вращения*. Патент РФ 2757643. Заявл. 04.02.2021, опубл. 19.10.2021.

- [15] Зайдес С.А., Хо М.К. Маятниковое поверхностное пластическое деформирование цилиндрических заготовок. *Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия*, 2022, т. 65, № 5, с. 344–353, doi: <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-5-344-353>
- [16] Зайдес С.А., Хо М.К. Исследование напряженно-деформированного состояния деталей, упрочненных пластическим деформированием при циклическом нагружении. *Вестник машиностроения*, 2022, № 8, с. 28–35, doi: <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2022-8-28-35>
- [17] Зайдес С.А., Нгуен В.Х. Влияние кинематики локального нагружения на напряженно-деформированное состояние в очаге деформации. *Вестник ИргТУ*, 2017, т. 21, № 6, с. 22–29, doi: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-6-22-29>
- [18] Флорианович Г.М. Химический механизм растворения металлов. Основные и альтернативные представления. *Электрохимия*, 2000, т. 36, № 9, с. 1175–1181.
- [19] Пахомов В.С., Шевченко А.А. *Химическое сопротивление материалов и защита от коррозии*. Москва, Химия, Колосс, 2009. 444 с.

References

- [1] Semenova I.V., Florianovich G.M., Khoroshilov A.V. *Korroziya i zashchita ot korrozii* [Corrosion and corrosion protection]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006. 371 p. (In Russ.).
- [2] Shevchenko A.A. *Khimicheskoe soprotivlenie nemetallicheskih materialov i zashchita ot korrozii* [Chemical resistance of non-metallic materials and corrosion protection]. Moscow, Khimiya Publ., KolosS Publ., 2006. 246 p. (In Russ.).
- [3] McEvily A.J. *Metal failures. Mechanisms, analysis, prevention*. John Wiley & Sons, 2002. 324 p. (Russ. ed: *Analiz avariynykh razrusheniy*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2010. 413 p.)
- [4] Kuznetsov A.M., ed. *Rassledovanie intsidentov i avari na opasnykh proizvodstvennykh obektakh* [Investigation of incidents and accidents at hazardous production facilities]. Irkutsk. Izd-vo IrGTU Publ., 2011. 272 p. (In Russ.).
- [5] Lebedev V.A. *Effektivnye tekhnologii poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya i kombinirovannoy obrabotki* [Effective techniques in surface plastic forming and combined machining]. Moscow, Spektr Publ., 2014. 402 p. (In Russ.).
- [6] Biswas S., Alavi S.H., Sedai B. et al. Effect of ultrasonic vibration-assisted laser surface melting and texturing of Ti-6Al-4V ELI alloy on surface properties. *J. Mater. Sci. Technol.*, 2019, vol. 35, no. 2, pp. 295–302, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.09.057>
- [7] Li Y.B., Zhang Q.X., Qi L. et al. Improving austenitic stainless steel resistance spot weld quality using external magnetic field. *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2018, vol. 23, no. 7, pp. 619–627, doi: <https://doi.org/10.1080/13621718.2018.1443997>
- [8] Grzesik W., Rech J., Żak K. High-precision finishing hard steel surfaces using cutting, abrasive and burnishing operations. *Procedia Manuf.*, 2015, vol. 1, pp. 619–627, doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.048>
- [9] Roux J.D.L., Craig I.K. Requirements for estimating the volume of rocks and balls in a grinding mill. *IFAC-PapersOnLine*, 2017, vol. 50, no. 1, pp. 1169–1174, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.403>
- [10] Frihat M.H., Al Quran F.M.F., Al-Odat M.Q. Experimental investigation of the influence of burnishing parameters on surface roughness and hardness of brass alloy. *Material Sci. Eng.*, 2015, vol. 5, no. 1, art. 1000216, doi: <https://doi.org/10.4172/2169-0022.1000216>
- [11] Parasiz S.A., Kutucu Y.K., Karadag O. On the utilization of Sachs model in modeling deformation of surface grains for micro/meso scale deformation processes. *J. Manuf. Process.*, 2021, vol. 68-A, pp. 1086–1099, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.033>
- [12] Blyumenshteyn V.Yu., Smelyanskiy V.M. *Mekhanika tekhnologicheskogo nasledovaniya na stadiyakh obrabotki i ekspluatatsii detaley mashin* [Technological inheritance mechanics in the machining and operating stages of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007. 399 p. (In Russ.).
- [13] Ezhelev A.V., Bobrovskiy I.N., Lukyanov A.A. Analysis of processing ways by superficial and plastic deformation. *Fundamentalnye issledovaniya* [Fundamental Research], 2012, no. 6–3, pp. 642–646. (In Russ.).

- [14] Zaydes S.A., Kho M.K. *Sposob poverkhnostno-plasticheskogo deformirovaniya naruzhnoy poverkhnosti detali v vide tela vrashcheniya* [Method for surface-plastic deformation of the external surface of the part in the form of a rotation body]. Patent RU 2757643. Appl. 04.02.2021, publ. 19.10.2021. (In Russ.).
- [15] Zaydes S.A., Kho M.K. Pendulum surface plastic deformation of cylindrical blanks. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy], 2022, vol. 65, no. 5, pp. 344–353, doi: <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-5-344-353> (in Russ.).
- [16] Zaydes S.A., Kho M.K. Stress–strain state of components hardened by plastic deformation under cyclic loading. *Vestnik mashinostroeniya*, 2022, no. 8, pp. 28–35, doi: <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2022-8-28-35> (in Russ.). (Eng. version: *Russ. Engin. Res.*, 2022, vol. 42, no. 11, pp. 1125–1132, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X22110260>)
- [17] Zaydes S.A., Nguen V.Kh. Local loading kinematics effect on stress-strain state in deformation zone. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2017, vol. 21, no. 6, pp. 22–29, doi: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-6-22-29> (in Russ.).
- [18] Florianovich G.M. Electroless dissolution of metals: substantiation and alternative notions. *Elektrokhiimiya*, 2000, vol. 36, no. 9, pp. 1175–1181. (In Russ.). (Eng. version: *Russ. J. Electrochem.*, 2000, vol. 36, no. 10, pp. 1037–1042, doi: <https://doi.org/10.1007/BF02757521>)
- [19] Pakhomov V.S., Shevchenko A.A. *Khimicheskoe soprotivlenie materialov i zashchita ot korrozii* [Chemical resistance of materials and corrosion protection]. Moscow, Khimiya Publ., Koloss Publ., 2009. 444 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 15.05.2023

Информация об авторах

ЗАЙДЕС Семен Азикович — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий. Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, Россия, e-mail: zsa@istu.edu).

ХО Минь Куан — аспирант кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий. Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, Российская Федерация, e-mail: minhquanho2605@gmail.com).

Information about the authors

ZAIDES Semen Azikovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Professor of the Department of Materials Science, Welding and Additive Technologies. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83, e-mail: zsa@istu.edu).

HO Minh Quan — Postgraduate, Department of Materials Science, Welding and Additive Technologies. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83, e-mail: minhquanho2605@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Зайдес С.А., Хо Минь Куан. Влияние маятникового поверхностного пластического деформирования на коррозионную стойкость деталей машин. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 7, с. 54–63, doi: [10.18698/0536-1044-2023-7-54-63](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-7-54-63)

Please cite this article in English as:

Zaides S.A., Ho Minh Quan. Influence of the pendulum surface plastic deformation on the machine part corrosion resistance. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 7, pp. 54–63, doi: [10.18698/0536-1044-2023-7-54-63](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-7-54-63)