

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 11 (161). С. 32-40.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 11 (161). P. 32-40.

Научная статья  
УДК 621.787.6.004  
doi: 10.30987/2223-4608-2024-32-40

### Исследование возможностей повышения комплекса эксплуатационных свойств волновым деформационным упрочнением

Сергей Владимирович Баринов, к.т.н.

Владимирский государственный университет, Брянск, Россия  
box64@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1341-446X>

**Аннотация.** В работе формулируется необходимость выявления технологического метода обработки, способного обеспечить формирование в обрабатываемом материале за одну технологическую операцию комплекса повышенных эксплуатационных свойств. Для решения поднятой проблемы предлагается использование технологии волнового деформационного упрочнения (ВДУ). Особенность технологии заключается в возможности одновременного управления рядом технологических параметров и воздействии на обрабатываемый материал пролонгированными ударными импульсами, характеризующимися передачей энергии удара в очаг деформации более 65 %. За счет наличия большого числа управляемых технологических параметров, ВДУ позволяет достаточно точно регулировать равномерность упрочнения и формировать упрочненные области на глубине до 15 мм. Возможность точного регулирования равномерности упрочнения позволяет избежать формирования перенаклёпа поверхностного слоя, что существенно отличает ВДУ от других динамических способов поверхностного пластического деформирования, например, чеканки. При неравномерном упрочнении ВДУ, в поверхностном слое формируется регулярно чередующиеся твердые и вязкие области, называемые гетерогенной структурой. Анализ литературных источников показал, что наличие в поверхностном слое таких областей, делает его перспективным для повышения эксплуатационных свойств. В работе приводятся результаты экспериментальных исследований влияния созданной ВДУ гетерогенной структуры на эксплуатационные свойства: сопротивление контактному выкрашиванию; циклическую прочность в условиях знакопеременных нагрузок, коррозионную стойкость. Лабораторные исследования эксплуатационных свойств проводились как на серийном технологическом оборудовании, так и на специально разработанном. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения ВДУ для повышения комплекса эксплуатационных свойств и существования «универсального» режима обработки.

**Ключевые слова:** циклическая прочность, коррозионная стойкость, сопротивление контактному выкрашиванию, эксплуатационные свойства, технология, волновое деформационное упрочнение.

**Для цитирования:** Баринов С.В. Исследование возможностей повышения комплекса эксплуатационных свойств волновым деформационным упрочнением // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 11 (161). С. 32–40. doi: 10.30987/2223-4608-2024-32-40

## Research into the possibilities for the improvement of a number of operational properties using wave strain hardening

Sergey V. Barinov, PhD. Eng.  
Vladimir State University, Bryansk, Russia  
box64@rambler.ru

**Abstract.** The paper states the need to identify a processing method through which increased operational properties in the work material can be obtained within a single process step. To solve the raised problem, the use of wave strain hardening (WSH) technology is proposed. The peculiarity of the technology lies in the possibility of simultaneous control of a number of technological parameters and the effect on the processed material of prolonged shock pulses characterized by the transfer of impact energy to the deformation site of more than 65%. Due to the presence of a large number of controlled process variables, the WSH allows fine adjusting of the uniformity of hardening and forming hardened areas at a depth of up to 15 mm. Due to the fine adjustment of the uniformity of hardening it becomes possible to avoid the formation of excessive cold work hardening of the surface layer and it makes great difference between WSH and other dynamic methods of surface plastic deformation, for example, stamping. With uneven hardening of WSH, solid and viscous regions take regular turns in the surface layer, forming a heterogeneous structure. The analysis of literature sources has shown that the presence of such areas in the surface layer makes it promising for purposes of operational properties improvement. The paper presents the results of experimental studies of the effect of the heterogeneous structure created by WSH on the operational properties: resistance to contact staining; cyclic strength under alternating loads, corrosion resistance. Laboratory studies of operational properties were carried out both using production equipment and specially designed facilities. The results obtained indicate the prospects of using WSH for operational properties increase and the existence of a "universal" operation mode.

**Keywords:** cyclic strength, corrosion resistance, resistance to contact breaking off, operational properties, technology, wave strain hardening.

**For citation:** Barinov. S.V. Research into the possibilities for the improvement of a number of operational properties using wave strain hardening / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 11 (161). P. 32–40. doi: 10.30987/2223-4608-2024-32-40

### ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатационные свойства – это совокупность характеристик материала, которые определяют его работоспособность в процессе эксплуатации изделия [1]. Обеспечивают требуемые эксплуатационные свойства различными способами, в том числе технологическими [2]. Существует много примеров повышения эксплуатационных свойств, за счет применения тех или иных технологий.

Так, объемным скоростным нагревом ТВЧ стали 20X13 удалось создать структуру, состоящую из равномерно распределенного в мартенсите повышенного количества (18...20 %) остаточного аустенита, что привело к повышению долговечности при действии контактных нагрузок до 6 раз [3].

Применение обработки поверхности ультразвуковой прокаткой нержавеющей стали привело не только к измельчению её зерна, и увеличению до трех раз

микротвердости, но и существенному росту коррозионной стойкости [4].

Приведенные примеры говорят о высокой перспективности применения технологических способов для повышения эксплуатационных свойств. Однако, как показывает практика, разработка новых технологий направлена на повышение одного-двух эксплуатационных свойств изделия. Для повышения комплекса эксплуатационных свойств, как правило, изделие подвергается нескольким технологическим операциям, что значительно увеличивает себестоимость и снижает производительность обработки [5]. Поэтому, важной является задача обеспечения в обрабатываемом материале комплекса эксплуатационных свойств за одну технологическую операцию.

Технология волнового деформационного упрочнения (ВДУ) разработана и запатентована в 1997 г. профессорами Киричком А.В., Соловьевым Д.Л., Лазуткиным А.Г. [6, 7]. ВДУ относится к

динамическим (ударным) способам поверхностного пластического деформирования. Особенность технологии заключается в передаче энергии  $A$  в очаг деформации через промежуточное звено – волновод, длина  $L_2$  которого в 3 – 5 раз меньше длины бойка  $L_1$ , наносящего удары (рис. 1). Для устранения отскока после удара и более полной передачи энергии в очаг деформации, волновод предварительно статически поджимается к инструменту с силой  $P_{ст}$ .

В результате удара, в очаге деформации формируется пролонгированный ударный импульс, состоящий из головной и хвостовой частей. Большая длительность ударного импульса и передаваемая энергия, в очаг деформации, позволяют достичь КПД используемой ударной системы ВДУ свыше 65 %. В результате обработки в обрабатываемом материале может быть обеспечена степень упрочнения до 150 % и глубина до 15 мм. Так как ВДУ обладает большим количеством управляемых технологических факторов, то есть возможность обеспечения дозированного упрочнения поверхностного слоя, приводящего к созданию равномерного чередования в поверхностном слое чередования твердых и вязких составляющих – гетерогенной структуры [8 – 10].

Равномерность упрочнения в результате ВДУ управляется сочетанием подачи обрабатываемого материала  $S$ , мм/мин, частотой ударов  $f$ , Гц и комплексного технологического параметра, учитывающего физико-механические характеристики обрабатываемого материала  $\sigma$ , мм – ширину отпечатка, формируемого в результате удара инструмента для ВДУ.

Практическим описанием совокупности характеристик данных параметров является коэффициент перекрытия пластических отпечатков  $K$ . В случае нанесения ударов инструмента в одно и то же место, без смещения обрабатываемого материала,  $K = 1$ . При нанесении отпечатков ударов инструмента, края которых граничат друг с другом, не перекрываются,  $K = 0$ . Формируемые области на поверхности обрабатываемого материала, упрочненные в результате ВДУ с разными величинами коэффициента перекрытия, представлены на рис. 2.

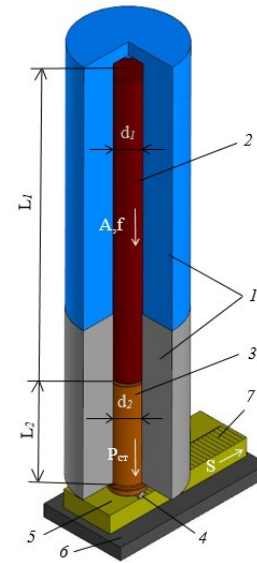


Рис. 1 Схема ВДУ:

1 – корпус генератора импульсов; 2 – боёк; 3 – волновод; 4 – инструмент; 5 – деталь; 6 – стол станка; 7 – упрочненная область

Fig. 1 Diagram of the WSH:

1 – pulse generator housing; 2 – open die; 3 – wg; 4 – tool; 5 – part; 6 – machine bench; 7 – hardened area

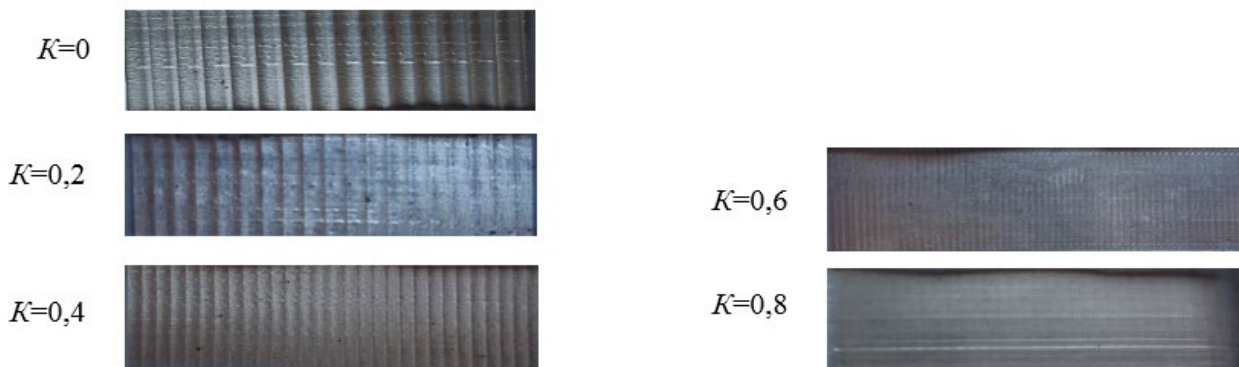


Рис. 2. Формируемые упрочнённые области при ВДУ с разными величинами коэффициента перекрытия

Fig. 2. The formed hardened areas are given with different values of the overlap ratio

Формируемые гетерогенные структуры ВДУ с различными величинами коэффициента перекрытия  $K$  представлены на рис. 3 [11].

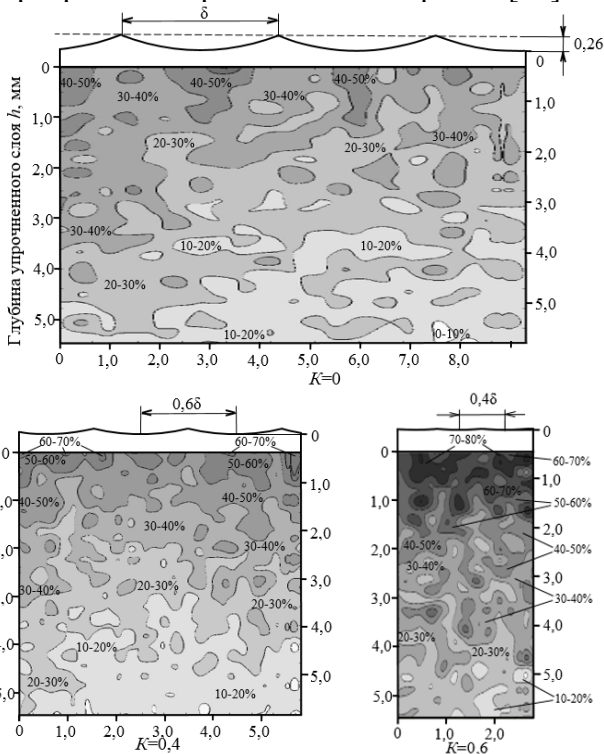


Рис. 3. Карты распределения микротвердости (степени упрочнения, %) под упрочненными областями после ВДУ с разными коэффициентами перекрытия  $K$

Fig. 3. Maps of the distribution of microhardness (degree of hardening, %) under the hardened areas after WSH with different overlap ratio  $K$

Ранее, ряд исследователей подтвердил перспективность применения гетерогенной структуры для повышения эксплуатационных свойств материалов. Так, в работах [12, 13] удалось повысить в 2 – 3 раза контактную выносливость зубчатых колес, за счет нанесения лаковых масок на рабочие поверхности и формирования в них гетерогенной структуры химико-термической обработкой. Варьируя режимами лазерной закалки, в работе [14], в поверхностном слое создано чередование областей с разной твердостью, приведших на 30...50 % к повышению усталостной долговечности выступов и впадин резьб.

Учитывая широкие возможности ВДУ по управлению технологическими параметрами обработки и перспективности применения гетерогенной структуры для повышения эксплуатационных свойств целью данной работы является исследование влияния

волнового деформационного упрочнения на комплекс эксплуатационных свойств в обрабатываемом материале за одну технологическую операцию, а также исследование взаимосвязи между режимами ВДУ и рядом эксплуатационных свойств.

## Материалы и методы

Для установления взаимосвязей с волновым деформационным упрочнением определены следующие эксплуатационные свойства: сопротивление контактному выкрашиванию; циклическая прочность в условиях знакопеременных нагрузок, коррозионная стойкость. Выбор данного перечня эксплуатационных свойств связан с наличием запроса от научных и инженерно-технических работников, а также других участников реальных производственных процессов.

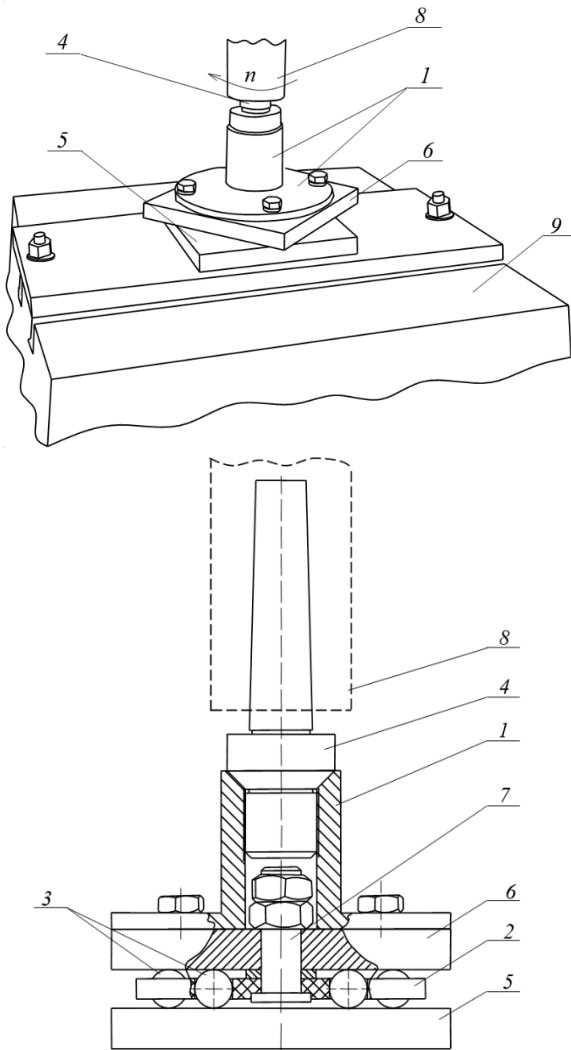
Сопротивление контактному выкрашиванию (СКВ)  $\Delta I$  является комплексным параметром, учитывающим изменение в процессе испытаний размеров следов дорожек катания шаров, и площадей, возникших на них выкрашиваний.

Для экспериментальной оценки взаимосвязей ВДУ с сопротивлением контактному выкрашиванию взяты образцы из сталей 45, 40X и 35ХГСА с исходной микротвердостью 2000...2200 МПа. Выбор материала обусловлен тем, что сталь 45 является эталонной в машиностроении, а стали 40X и 35ХГСА используются для создания тяжело нагруженных деталей машин, работающих в условиях контактных циклических нагрузок. Образцы представляют собой пластины толщиной 20 мм, которые упрочнялись с различной удельной энергией ударов ( $5 < a < 7$  Дж/мм) и с различными значениями коэффициента перекрытия  $K$ . В качестве инструмента использовались стержневые ролики диаметром 10 мм [15].

Исследование СКВ проводилось на экспериментальном стенде, размещенном на сверлильном станке (рис. 4).

Испытания проводились следующим образом. Через конус 4 верхняя пластина с упрочненными образцами за счет вертикального перемещения шпинделя станка поджималась к нижней через шары 3, установленные в сепараторе 2. Сила поджатия пропорциональна

силе нажатия на рукоятку ручного перемещения шпинделя станка, которая регулируется подвешиваемыми к ней грузами.



**Рис. 4. Экспериментальный стенд для исследований сопротивления контактному выкрашиванию плоских поверхностей:**

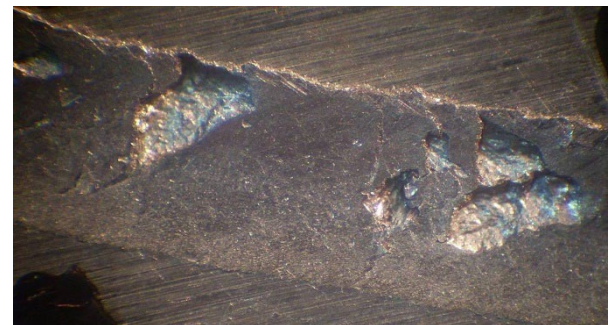
1 – оправка; 2 – сепаратор; 3 – шары; 4 – конус; 5 – нижняя пластина с упрочненными образцами; 6 – верхняя пластина с упрочненными образцами; 7 – ось; 8 – шпиндель станка; 9 – стол станка [15]

**Fig. 4. test bed for studies of resistance to contact break-off for flat surfaces:**

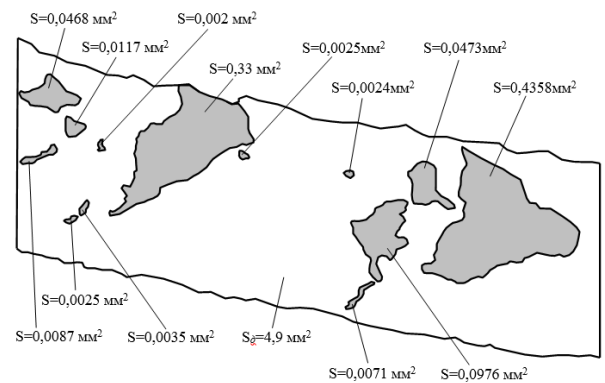
1 – bend former; 2 – separator; 3 – balls; 4 – cone; 5 – lower plate with hardened samples; 6 – upper plate with hardened samples; 7 – axis; 8 – main spindle; 9 – machine bench [15]

При включении вращения шпинделя с заданной частотой, шары совершают круговое обкатывающее движение по поверхности верхней 6 и нижней 5 пластин с упрочненными образцами. В зону контакта шаров с испытуемой поверхностью может осуществляться

регулярный подвод смазки, например, индустриального масла. При достижении заданного числа циклов контактного нагружения испытания завершаются, упрочненные образцы извлекаются из пластин 5 и 6 и подвергаются лабораторным исследованиям. После испытаний оценивались размеры следов дорожек катания шаров и площадь возникших на них выкрашиваний на неупрочненных и упрочненных с различной равномерностью упрочнения и делались заключения о сформированных величинах СКВ в материале (рис. 5).



a)



b)

**Рис. 5. Фрагмент дорожки качения шаров со следами выкрашиваний:**

a – фотография при увеличении  $\times 50$ ; б – численное определение площадей полученных выкрашиваний и дорожки качения шаров [15]

**Fig. 5. Fragment of the ball raceway with traces of breaking off:**  
a – photograph enlargement  $\times 50$ ; b – numerical determination of the areas of the resulting flaking and the ball raceway [15]

Оценка влияния ВДУ на циклическую прочность проводилась в условиях знакопеременных нагрузок на серво-гидравлической испытательной машине Torsion 10 кНм, которая

может выполнять статическое и усталостное нагружение кручением с помощью высокомоментного гидромотора (рис. 6). В результате экспериментов исследовалось поведение материала, работающего в области малоциклового усталости (не более  $5 \times 10^4$  циклов) в условиях симметричного нагружения при циклическом скручивании. Оценивали число циклов нагружения до разрушения. Материалами для образцов служили сварные пластины из стали 30ХГСА. Выбор материала связан с его широким применением для изготовления сварных конструкций, работающих в условиях знакопеременных нагрузок.

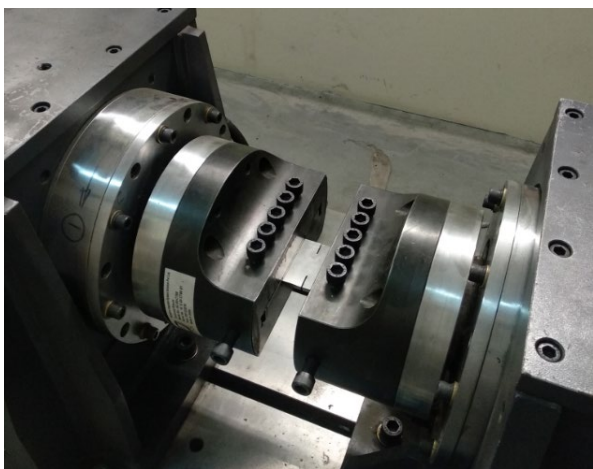


Рис. 6. Серво-гидравлическая испытательная машина Torsion 10 кНм

Fig. 6. Torsion 10 kNm servo-hydraulic testing machine

ВДУ проводилось с энергией 150 Дж с частотой ударов 10 Гц и с режимами, обеспечивающими перекрытие отпечатков ударов инструмента с коэффициентом  $K = 0,3$ . Выбор данного значения коэффициента перекрытия  $K$  обоснован данными предварительных экспериментов, как наиболее эффективное значение для условий циклического нагружения [7]. В качестве инструмента, при ВДУ использовался стержневой ролик диаметром 10 мм и шириной 40 мм.

До настоящего времени нет единого мнения о влиянии поверхностного пластического деформирования на коррозионную стойкость [16 – 19]. Как правило, исследуются потенциальные возможности повышения данного эксплуатационного свойства новыми

технологиями. Исследование влияния ВДУ на коррозионную стойкость проводилось на установке для проведения коррозионных испытаний в соляном тумане S1000 (рис. 7). Эксперимент проводился согласно ГОСТ 28207-89, ГОСТ 9.908-85 на стали 30ХГСА. Потеря массы образцов после испытаний на коррозионную стойкость оценивалась на весах СЕ224–С. В качестве инструмента для ВДУ применялся стержневой ролик диаметром 10 мм. Обработка с отличающимися коэффициентами перекрытия пластических отпечатков, частотой ударов 9...14 Гц, и удельной энергией удара, варьируемой в диапазоне от 4 до 8 Дж/мм, обеспечивает разную величину деформации обработанного материала.



Рис. 7. Установка для проведения коррозионных испытаний в соляном тумане S1000

Fig. 7. Installation for conducting corrosion tests in salt mist S1000

### Исследование влияния ВДУ на сопротивление контактному выкрашиванию

Результаты экспериментальных исследований сопротивления контактному выкрашиванию представлены в виде графиков на рис. 8.

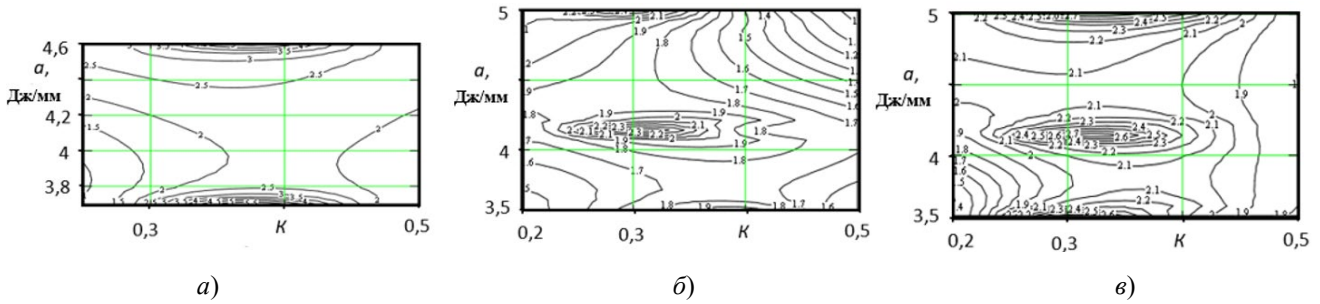


Рис. 8. Зависимости сопротивления контактному выкрашиванию  $\Delta I$  от удельной энергии ударов  $a$  и коэффициента перекрытия  $K$ :

$a$  – сталь 45;  $b$  – сталь 40X;  $c$  – сталь 35ХГСА

Fig. 8. Dependences of the resistance to contact breaking off  $\Delta I$  on the specific impact energy  $a$  and the overlap ratio  $K$ :  
 $a$  – steel 45;  $b$  – steel 40Cr;  $c$  – steel 35CCrMnSi

Так, при исследовании влияния коэффициента перекрытия на  $\Delta I$  было установлено, что у стали 45 максимальные значения  $\Delta I = 4...6$  наблюдались при значении  $K = 0,4$  (см. рис. 8,  $a$ ). Наиболее эффективные значения  $\Delta I$  у сталей 40X и 35ХГСА были достигнуты при  $K = 0,3$  и составили соответственно  $2...2,3$  и  $2,1...2,8$  (см. рис. 8,  $b$ ,  $c$ ) [15]. Влияние величины удельной энергии удара на сопротивление контактному выкрашиванию на всех исследуемых сталях показало, что с увеличением  $a$ , диапазон эффективных значений  $\Delta I$  смещается в сторону меньшего значения коэффициента перекрытия, что связано с увеличением зоны деформируемого металла под единичным отпечатком.

#### Исследование влияния ВДУ на циклическую прочность в условиях знакопеременных нагрузок.

Режимы циклических испытаний пластин из стали 30ХГСА составили: нагрузка  $190 \text{ Н} \times \text{м}$ , частота нагружения  $0,15 \text{ Гц}$ . Так, при циклическом испытании пластин из стали 30ХГСА без швов и упрочнения, появление первых трещин настало при 1700 циклах, а при 4100 наступило разрушение. У сварных пластин без ВДУ первые трещины возникли после 2150 циклов, а разрушился образец при 5950 циклах нагружения. Испытания пластин со сварным швом, обработанным ВДУ, показали образование трещин после 3110 циклов нагружения, а на 9900 цикле возникло разрушение материала.

На основании анализа результатов экспериментов установлено повышение прочности сварных швов, работающих в условиях знакопеременных нагрузок после их упрочнения волной деформации для стали 30ХГСА в 1,7 раза по сравнению со сварными образцами без упрочнения и в 2,4 раза, с материалами без сварки и упрочнения (рис. 9).



Рис. 9. Результаты циклических испытаний стали 30ХГСА:

1 – образцы без шва; 2 – образцы со сварным швом без ВДУ; 3 – образцы со сварным швом, упрочненным ВДУ

Fig. 9. The results of cyclic tests of 30CCrMnSi steel:  
1 – samples without a seam; 2 – samples with a welded seam with no WSH; 3 – samples with a welded seam reinforced by WSH

Также отмечено, что ВДУ способствовало увеличению отношения допустимого числа циклов нагружения к числу циклов, при которых появилась первая трещина –  $t$ . Так, для сварных швов после ВДУ, у образцов из стали 30ХГСА значение  $t$  составило 3,2. Тогда как у образцов со сварными швами без ВДУ  $t = 2,7$ , а у материалов без сварки и упрочнения  $t = 2,4$ . Таким образом, наличие обработки ВДУ способствует повышению в несколько раз числа циклов до разрушения упрочненных сварных швов, после появления первых трещин.

#### Исследование влияния ВДУ на коррозионную стойкость

Неупрочненные образцы из стали 30ХГСА имели твердость HV равную 1540 МПа,

потери в результате исследований коррозионной стойкости составили  $6,7 \times 10^{-5}$  г/мм<sup>3</sup> (рис. 10). После упрочнения с  $K = 0,3$  в поверхностном слое наблюдались степень и глубина упрочнения, соответственно, 38 % и 7 мм, а потери равнялись  $4,7 \times 10^{-5}$  г/мм<sup>3</sup>. При упрочнении с  $K = 0,6$  в поверхностном слое установлены степень упрочнения равная 43 %, а глубина упрочнения 7 мм. Потери в результате исследований коррозионной стойкости составили  $4,5 \times 10^{-5}$  г/мм<sup>3</sup>.

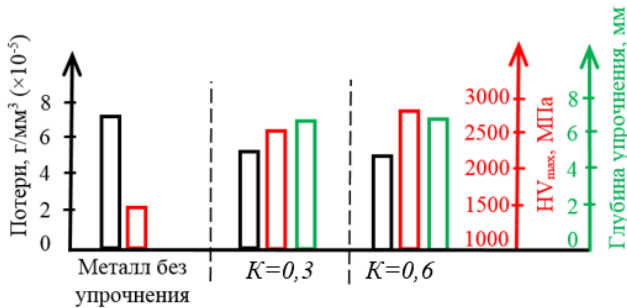


Рис. 10. Взаимосвязь коррозионной стойкости, глубины упрочнения и микротвердости стали 30ХГСА после ВДУ

Fig. 10. The relationship of corrosion resistance, hardening depth and microhardness of 30CrMnSi steel after WSH

## Выводы

1. Установлена перспективность повышения комплекса эксплуатационных свойств за одну технологическую операцию, посредством волнового деформационного упрочнения.
2. Установлено, что технология ВДУ за счет наличия большого числа управляемых технологических параметров может формировать в поверхностном слое регулярно чередующиеся области с твердыми и вязкими участками – гетерогенной структурой, позволяющей повысить эксплуатационные свойства обрабатываемого материала.
3. Установлено, что сформированная гетерогенная структура с равномерностью упрочнения  $0,3 \leq K \leq 0,4$  способна повысить сопротивление контактному выкрашиванию рассматриваемых сталей в 1,8 – 6 раз.
4. Установлено, что образцы со сварными швами, обработанные ВДУ, испытанные в условиях знакопеременных нагрузок, позволили повысить циклическую прочность в 1,7 раза по сравнению со сварными швами без упрочнения и в 2,4 раз с исходным материалом.
5. Установлена возможность повышения коррозионной стойкости исследуемых

материалов после ВДУ на 30...32 % по сравнению с неупрочненным материалом.

6. Установлен универсальный режим ВДУ (удельная энергия 2,5...6 Дж/мм; частота 9...14 Гц; коэффициент перекрытия 0,3...0,4), позволяющий за одну технологическую операцию повысить комплекс технологических свойств упрочняемого материала.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Справочник технолога: справочник** / А.Г. Суслов, В.Ф. Безъязычный, Б.М. Базров [и др.] ; под редакцией А. Г. Сулова. М.: Машиностроение, 2019. 800 с.
2. **Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений** / А. Г. Суслов [и др.] ; под общ. ред. А.Г. Сулова. М.: Машиностроение, 2006. 447 с.
3. **Патент №1782243 РФ**. Способ термообработки изделий / А.П. Чейлях, Л.С. Малинов. Бюлл. № 46, 1992.
4. **Zheng, Z.J., Gao, Y., Gui, Y., Zhu, M.** Corrosion Behaviour of Nanocrystalline 304 Stainless Steel Prepared by Equal Channel Angular Pressing Corrosion Science 54 2012: pp. 60–67.
5. **Фундаментальные основы технологического обеспечения и повышения надежности изделий машиностроения** / А.Г. Суслов, В.П. Федоров, О.А. Горленко [и др.]. М.: Издательство «Инновационное машиностроение», 2022. 552 с.
6. **Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г.** Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием. Библиотека технолога. М.: Машиностроение, 2004. 288 с.
7. **Справочник по процессам поверхностного пластического деформирования** / С.А. Берберов, В.Ю. Блюменштейн, А.И. Болдырев [и др.]. Том 1. Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2021. 504 с.
8. **Kirichek, A.V., Barinov S.V.** Relationship Between Processing Parameters, Product Dimensions, and Wave Strain Hardening // Journal of Manufacturing Science and Engineering. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers. 2022. Vol. 144. No 3. P. 034501. DOI 10.1115/1.4052008.
9. **Kirichek, A.V., Barinov S.V.** Development of Parameters Describing Heterogeneous Hardened Structure / A.V. Kirichek, // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 756. P. 75–78. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.756.75.
10. **Kirichek A.V., Kuzmenko A.P., Altukhov A.Y. et al.** Dimensional effects in micro- and nanostructural changes in grain and intragrain structure of steel 45 at static-pulse treatment // Journal of Nano and Electronic Physics. 2015. Vol. 7. No 4. P. 04023. DOI 2077-6772/2015/7(4)04023(4)
11. **Kirichek, A. V., Barinov S.V.** Study of Methods Relating to Increase of Contact Pitting Resistance in 45, 40H, 35HGSA Steel due to Development of Heterogeneous Structure Involving Mechanical Hardening Technique // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 756. P. 65–69. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.756.65.
12. **Иванов Г.П., Каргонова Л.В., Худошин А.А.** Повышение износостойкости деталей созданием



регулярной гетерогенной макроструктуры // Строительные и дорожные машины. 1997. № 1. С. 33–34.

13. Патент № 2090828 РФ. Противопульная гетерогенная броня из легированной стали для средств индивидуальной защиты и способ ее получения / Л.А. Кирель, О.М. Михайлова, С.А. Журавлев. Бюлл. № 26, 1997.

14. Патент №2047661 РФ. Способ обработки резьбового изделия / В.С. Аванесов, Б.А. Авербух, Д.Г. Ашигян. Бюлл. № 6, 1995.

15. Справочник по процессам поверхностного пластического деформирования / И.Р. Асланян, С.В. Баринов, В.Ф. Безьязычный [и др.]. Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2022. 584 с.

16. Nie M., Wang C. T., Qu M. et al. The corrosion behaviour of commercial purity titanium processed by high-pressure torsion. *J Mater Sci* 49, 2824–2831 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7988-z>.

17. Соловей С.А. Современное состояние методов повышения коррозионной стойкости и сопротивления коррозионной усталости сварных соединений (обзор) // Автоматическая сварка. 2017. № 3. С. 51–58.

18. Effect of surface and bulk plastic deformations on the corrosion resistance and corrosion fatigue performance of AISI316L / Aymen A. Ahmed et al. // *Surface & coating Technology*. 2014. Vol. 259. P. 448–455.

19. Effect of cold working and sandblasting on the microhardness, tensile strength and corrosion resistance of AISI316L stainless steel / Suyitno et al. // *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2012. Vol. 19/ № 12. P. 1093–1099.

## REFERENCES

1. Technologist's handbook: handbook / A.G. Suslov, V.F. Bezylazny, B.M. Bazrov [et al.]; edited by A. G. Suslov. Moscow: Mashinostroenie, 2019, 800 p.

2. Technological support and improvement of the operational properties of parts and their joints/ A. G. Suslov [et al.]; under the general editorship of A.G. Suslov. Moscow: Mashinostroenie, 2006, 447 p.

3. Patent No.1782243 of the Russian Federation. The method of heat treatment of products / A.P. Cheylakh, L.S. Malinov. Bull. No. 46, 1992.

4. Zheng, Z.J., Gao, Y., Gui, Y., Zhu, M. Corrosion Behaviour of Nanocrystalline 304 Stainless Steel Prepared by Equal Channel Angular Pressing *Corrosion Science* 54 2012: pp. 60–67.

5. Fundamental principles of engineering support and reliability improvement of the engineering products / A.G. Suslov, V.P. Fedorov, O.A. Gorlenko [et al.]. Moscow: Publishing house «Innovative engineering», 2022, 552 p.

6. Kirichek A.V., Solovyov D.L., Lazutkin A.G. Technology and equipment for static pulse processing by surface plastic deformation. Library of technologist. Moscow: Mashinostroenie, 2004, 288 p.

7. Reference on surface plastic deformation processes / S. A. Berberov, V.Y. Blumenstein, A.I. Boldyrev [et al.]. Volume 1. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University, 2021, 504 p.

8. Kirichek, A.V., Barinov S.V. Relationship Between Processing Parameters, Product Dimensions, and Wave Strain Hardening // *Journal of Manufacturing Science and Engineering. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*. 2022. Vol. 144. No 3. P. 034501. DOI 10.1115/1.4052008.

9. Kirichek, A.V., Barinov S.V. Development of Parameters Describing Heterogeneous Hardened Structure / A.V. Kirichek, // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 756. P. 75–78. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.756.75.

10. Kirichek A.V, Kuzmenko A.P., Altukhov A.Y. et al. Dimensional effects in micro- and nanostructural changes in grain and intragrain structure of steel 45 at static-pulse treatment // *Journal of Nano and Electronic Physics*. 2015. Vol. 7. No 4. P. 04023. DOI 2077–6772/2015/7(4)04023(4)

11. Kirichek, A.V., Barinov S.V. Study of Methods Relating to Increase of Contact Pitting Resistance in 45, 40H, 35HGSA Steel due to Development of Heterogeneous Structure Involving Mechanical Hardening Technique // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 756. P. 65–69. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.756.65.

12. Ivanov G.P., Kharitonova L.V., Khudoshin A.A. Increasing the wear resistance of parts by creating a regular heterogeneous macrostructure // *Construction and road machines*. 1997, no. 1, pp. 33–34.

13. Patent No. 2090828 of the Russian Federation. Bulletproof heterogeneous armor made of alloy steel for personal protective equipment and the method of its production / L.A. Kirel, O.M. Mikhailova, S.A. Zhuravlev. Bull. No. 26, 1997.

14. Patent No. 2047661 of the Russian Federation. The method of processing a threaded product / V.S. Avanesov, B.A. Averbukh, D.G. Ashigyan. Bull. No. 6, 1995.

15. Reference on surface plastic deformation processes / I.R. Aslanyan, S.V. Barinov, V.F. Bezylazny [et al.]. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University, 2022, 584 p.

16. Nie M., Wang C. T., Qu M. et al. The corrosion behaviour of commercial purity titanium processed by high-pressure torsion. *J Mater Sci* 49, 2824–2831 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7988-z>.

17. Solovey S.A. The current state of methods for increasing corrosion resistance and corrosion fatigue resistance of welded joints (review) // *Automatic welding*. 2017, no. 3. pp. 51–58.

18. Effect of surface and bulk plastic deformations on the corrosion resistance and corrosion fatigue performance of AISI316L / Aymen A. Ahmed et al. // *Surface & coating Technology*. 2014. Vol. 259. P. 448–455.

19. Effect of cold working and sandblasting on the microhardness, tensile strength and corrosion resistance of AISI316L stainless steel / Suyitno et al. // *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2012. Vol. 19/ № 12. P. 1093–1099.

Статья поступила в редакцию 28.03.2024; одобрена после рецензирования 10.04.2024; принята к публикации 17.04.2024.

The article was submitted 28.03.2024; approved after reviewing 10.04.2024; assepted for publication 17.04.2024.