



Научная статья
УДК 621.787.6:621.7(.09+.012+.015)
EDN: GJSHPH
DOI: 10.21285/1814-3520-2023-3-490-500

Влияние режимов обработки центробежно-ударным упрочнителем на микротвердость поверхности деталей из алюминиевых сплавов

Д.Ю. Казимиров^{1✉}, А.С. Исаченко²

^{1,2}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме. Цель – разработка инструмента для центробежно-ударной обработки и определение режимов обработки, увеличивающих микротвердость поверхности. Реализовано экспериментальное исследование, где в качестве технологических параметров центробежно-ударной обработки предложены натяг, количество рабочих ходов, частота вращения упрочнителя и подача. Эксперименты проводились на плоских фрезерованных образцах из алюминиевого сплава Д16Т. Был спроектирован и изготовлен опытный вариант ротационного упрочнителя с унификацией крепления. В ходе эксперимента выявлено, что вклад частоты вращения упрочнителя в изменение средней микротвердости выше, чем для продольной подачи. Отмечено значительное влияние натяга на поверхностную микротвердость: после обработки ротационным упрочнителем она возрастает. Показано, что данное увеличение в большей степени зависит от технологического натяга и в меньшей степени – от частоты вращения инструмента, которые рекомендуется повышать. Установлено, что увеличение натяга в 2 раза позволило добиться роста микротвердости на 70 HV 0,1 или на 42 HV 0,1 при увеличении частоты вращения инструмента на 200 об/мин. Однако при этом технологические параметры необходимо назначать с учетом работоспособности конструкции упрочнителя. Показано, что слабо влияющим фактором на повышение микротвердости является продольная подача. Таким образом, опытный образец спроектированного инструмента позволяет выполнять обработку как на станках фрезерной, расточной, так и шлифовальной групп с числовым программным управлением за счет унифицированного узла крепления. Это обеспечивает достаточную технологическую гибкость процесса и позволяет ориентировать его на упрочнение плоскостей и радиусов сопряжения. Прогнозируемое увеличение поверхностной микротвердости образца из Д16Т при помощи ротационного упрочнителя составляет 38,5% от исходной в исследуемой области экспериментирования при достаточной производительности.

Ключевые слова: ударное воздействие, режим упрочнения, конструкция ротационного инструмента, микротвердость поверхности, поверхностное упрочнение

Для цитирования: Казимиров Д.Ю., Исаченко А.С. Влияние режимов обработки центробежно-ударным упрочнителем на микротвёрдость поверхности деталей из алюминиевых сплавов // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 3. С. 490–500. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-490-500>. EDN: GJSHPH.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Influence of impact-centrifugal hardener on microhardness of workpiece surface made of aluminium alloys

Denis Yu. Kazimirov^{1✉}, Aleksei S. Isachenko²

^{1,2}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. This article develops a tool for impact-centrifugal processing and establishes processing modes that increase the microhardness of the surface. An experimental study was carried out, where the tightening force, the number of working strokes, the rotation frequency of the hardener and the motion were proposed as technological parameters of impact-centrifugal processing. The experiments were carried out using flat machine-cut samples based on aluminium alloy D16T. A prototype of the rotary hardener with the standard fastening was designed and manufactured. During the experiment, it was revealed that, for the variation in average microhardness, the contribution of the rotation frequency is

higher than that of the longitudinal motion. A significant influence of the tension on the surface microhardness is noted: following processing with a rotary hardener, it increases. It is shown that, to a greater extent, this increase depends on the technological tightening force and to a lesser extent on the rotation speed of the tool; it is recommended to increase these parameters. It was found that a 2-fold increase in tightening force resulted in an increase in microhardness by 70 HV 0.1, while increasing the tool rotation speed by 200 rpm led to an increase in microhardness by 42 HV 0.1. However, technological parameters must be selected taking into account the operability of the hardener. It was shown that the longitudinal motion has little influence on the increase in microhardness. The prototype of the designed tool can be used for processing at milling, boring, and grinding machines with computerised numerical control through a standardised fastening unit. This ensures sufficient technological flexibility and allows it to be used for reinforcing flat surfaces and fillet radii. The forecasted increase in the surface microhardness of the D16T sample using a rotary hardener amounts to 38.5% of the initial value in the experimental area with satisfactory productivity.

Keywords: impact peening, peening mode, centrifugal impact peening tool design, surface microhardness, surface hardening

For citation: Kazimirov D. Yu., Isachenko A.S. Influence of impact-centrifugal hardener on microhardness of workpiece surface made of aluminium alloys. *iPolytech Journal*. 2023;27(3):490-500. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-490-500> EDN: GJSHPH.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение прочности деталей машиностроения до сих пор является важной задачей. Поверхностное пластическое деформирование (ППД) – один из методов воздействия на поверхность деталей машин с целью упрочнения. Его применение в технологии изготовления объясняется значительным повышением несущей способности элементов конструкции и в первую очередь повышением усталостной прочности, которое связано с наклепом поверхностного слоя. В повышении прочности деталей машиностроения важны и другие характеристики. Точность размеров и формы деталей может быть получена при этом на предварительных операциях и сохранена при выполнении заключительной стадии ППД.

Следует отметить, что на повышение прочности оказывают воздействие многочисленные факторы упрочнения, которые можно объединить в следующие классы. Это режимные параметры процесса упрочнения, важным из которых является усилие, это и исходные физико-механические свойства и их изменение в период обработки, а также кинематические условия взаимодействия контактирующих тел. Такие факторы влияют на процесс формирования качественных показателей упрочненного поверхностного слоя.

Детали из алюминиевых сплавов для авиационного машиностроения имеют в основном плоскую форму, а длину – превышающую ширину в несколько раз, поэтому методы упрочнения ППД плоских поверхностей являются преимущественными. К таким процессам относят обкатывание и его разновидность с дополнительной энергией вибрации, чеканку, обработку дробью и виброударную обработку, ударно-барабанную обработку, а также центробежно-ударную обработку ротационным инструментом.

Интерес к процессам, связанным с ударными методами упрочнения, в частности с чеканкой, возрос в начале 2010-х годов, что отмечено в [1]. Авторы указывают на увеличение микротвердости в поверхностном слое алюминиевого сплава типа АК12, которое может достигать 70%, и вероятную глубину упрочненного слоя для цветных материалов до 3 мм. На качество влияют не только энергетические характеристики процесса чеканки, но и траектория предшествующей обработки, а также угол соударения [2]. Согласно [3], отмечается меньшая дисперсия поверхностного упрочнения за счет более стабильной интенсивности воздействия, что связано с пульсацией постоянной силы [4] по сравнению, например, с обработкой дробью [5], где этот параметр стохастичен по природе. Авторы там же отмечают, что обработка с пульсацией силы имеет незначительное рассеяние результата микротвердости по поверхности обработки, что доказано для низкоуглеродистой стали, при этом следы предшествующей обработки могут быть недостаточно полностью деформированы. Перспективой применения процесса ударной чеканки является повышение прочности деталей из спеченных сплавов в аддитивном производстве, которое исследовано в [6] на титановых сплавах.

В противовес ударной чеканке шариковое обкатывание плоских поверхностей отличается простотой конструкции инструмента, но характеризуется низкой производительностью и недостаточно высокой степенью наклепа, не превышающей 17% при глубине упрочнения 1 мм для алюминиевого сплава Д1 [7], которую можно незначительно повысить за счет дополнительных проходов [8].

Сопоставляя отмеченное ранее, дробеударные процессы обладают повышенной

дисперсией степени упрочнения из-за естественного рассеяния пучка дробы, не позволяющей добиться сплошного покрытия обработанного участка [9]. Но даже при таком недостатке наблюдается повышение эксплуатационных характеристик за счет уменьшения подповерхностных дефектов, особенно для спеченных алюминиевых сплавов [10]. Для дробеударной обработки показатели упрочнения ниже, чем для обкатывания, и не превышают 10% согласно [11] для сплава типа 1933, который подвергался обработке мелко-размерной дробью, или 22% для технического алюминия, который обрабатывался дробью диаметром 1 мм. Возможная глубина залегания сжимающих остаточных напряжений не превышает 0,3 мм [12] при наблюдаемом на поверхности максимуме твердости [13], но глубина даже при совершенствовании метода дробеобработки достигает не более 0,4 мм [14]. Еще меньший эффект оказывают вибро-наклеп микрошариками [15], обеспечивающий значения упрочненного слоя не более 50 мкм, или, например, жидкостное кавитационное бездробное упрочнение, при котором глубина не превышает 20 мкм [16].

Еще в СССР велись работы по исследованию центробежно-ударной обработки [17] и отмечалось увеличение поверхностной микротвердости на 50% по сравнению с исходной. Авиационные детали, особенно места подсечек и границы ступенчатого основания, хорошо поддаются такому процессу ротационным инструментом, установленным в наклонно-поворотной голове фрезерного станка с ЧПУ. Поэтому работу в этом направлении необходимо активизировать.

Цель – разработать инструмент для центробежно-ударной обработки на фрезерном станке, определить предпочтительные режимы обработки и установить величину поверхностной микротвердости при упрочнении алюминиевых деталей.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИНСТРУМЕНТ

Центробежно-ударная обработка из-за конструктивных особенностей ротационного упрочнителя имеет наиболее вероятную, но не точную картину формирования отпечатка или очага деформации в отличие от обкатывания, которое обеспечивает след в виде параллельных канавок вдавливания или чеканки бойками, следы которой имеют вид примыкающих друг к другу лунок. Для его более широкого

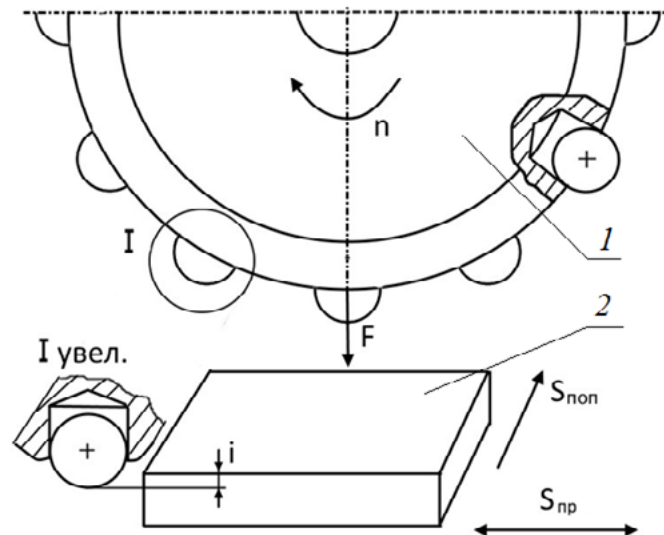


Рис. 1. Схема процесса центробежно-ударной обработки: 1 – вращающийся инструмент, 2 – деталь на столе станка

Fig. 1. Diagram of centrifugal impact peening: 1 – rotary tool, 2 – workpiece on the machine table

применения не хватает исследований технологической направленности. Поэтому авторы видят необходимость в уточнении знаний о процессе при обработке плоскостей: о влиянии подач инструмента на степень ее упрочнения и в установлении диапазона необходимых величин продольной $S_{пр}$ и поперечной подачи $S_{поп}$ (рис. 1), обеспечивающих условие роста производительности процесса центробежно-ударной обработки при повышении микротвердости поверхности.

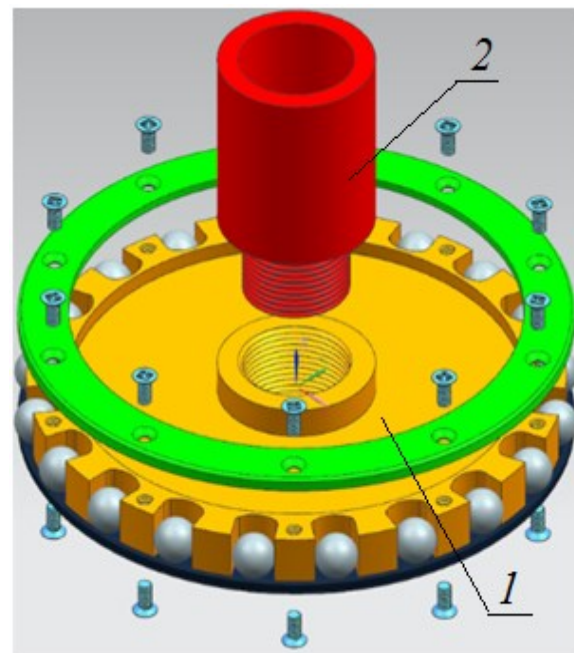


Рис. 2. Конструкция экспериментального упрочнителя: 1 – сборочная модель инструмента, 2 – съемный хвостовик

Fig. 2. Experimental peening tool design: 1 – tool assembly model, 2 – dismantlable shank

С целью выполнения указанных задач исследования был спроектирован (рис. 2) и изготовлен опытный вариант ротационного инструмента 1 диаметром $D = 205$ мм, с шариками от подшипников диаметром $d_{ш} = 15$ мм из материала ШХ15, с твердостью HRC 58–64, с количеством ударных элементов до 20. Для расширения технологических возможностей по установке ударного инструмента на станки фрезерной и шлифовальной групп выполнена унификация крепления упрочнителя. Это реализовано сменным хвостовиком 2, закрепляемым на резьбе по M35-8H/8h, со стандартным внутренним или внешним конусом, сопрягаемым со шпинделем станка.

Одним из важнейших технологических параметров центробежно-ударной обработки является натяг, влияющий на глубину и степень упрочнения. При вращении диска шарики под действием центробежных сил должны одинаково выступать над цилиндри-

ческой поверхностью диска. Это обеспечивает равномерность и постоянство наклепанного слоя. Известны рекомендуемые значения технологического натяга в системе инструмент–поверхность детали, которые должны задаваться с точностью до $\pm 0,05$ мм. В связи с погрешностями обработки и сборки ротационного упрочнителя шарики могут иметь разброс в значении натяга. Его определяли рычажно-зубчатым индикатором ИРБ 0–0,8 с ценой деления 0,01 мм, установленным под свободно висящим шариком. Так как вес шариков примерно одинаков, а сила пружины индикатора 2 постоянна, то в ходе измерения определяли не сам натяг, а относительную погрешность для данного упрочнителя 1 (рис. 3).

Результаты измерения показали расхождение этой величины в 0,3 мм. Была произведена пригонка каждого недостаточно широкого гнезда под шарик. Работа выполнялась на станке 676П без снятия инструмента.

Важной характеристикой технологического процесса является время обработки:

$$t = \frac{l_d}{S_{пр}} \cdot k,$$

где l_d – длина детали, мм; $S_{пр}$ – продольная подача инструмента, мм/мин; k – число рабочих ходов.

Число рабочих ходов зависит от ширины пятна контакта и рассчитывается для однократной обработки как

$$k = b_d / S_{поп}$$

где b_d – ширина детали, мм; $S_{поп}$ – величина поперечной подачи, согласно кинематике многопроходной обработке, мм/ход, либо мм/двойной ход инструмента.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения желаемого значения поперечной подачи был проведен эксперимент на фрезерованном образце Д16Т размерами 50х50 мм с толщиной 20 мм, являющийся частью детали типа «плита», закрепленном в тисках высокой точности. Обработка инструментом выполнялась после фрезерования и дополнительного плоского шлифования черным карбидом кремния, при котором была достигнута неплоскостность не более 0,02 мм, что позволило сократить ее влияние на изменение натяга. Для устранения погрешности закрепления образец не откреплялся,

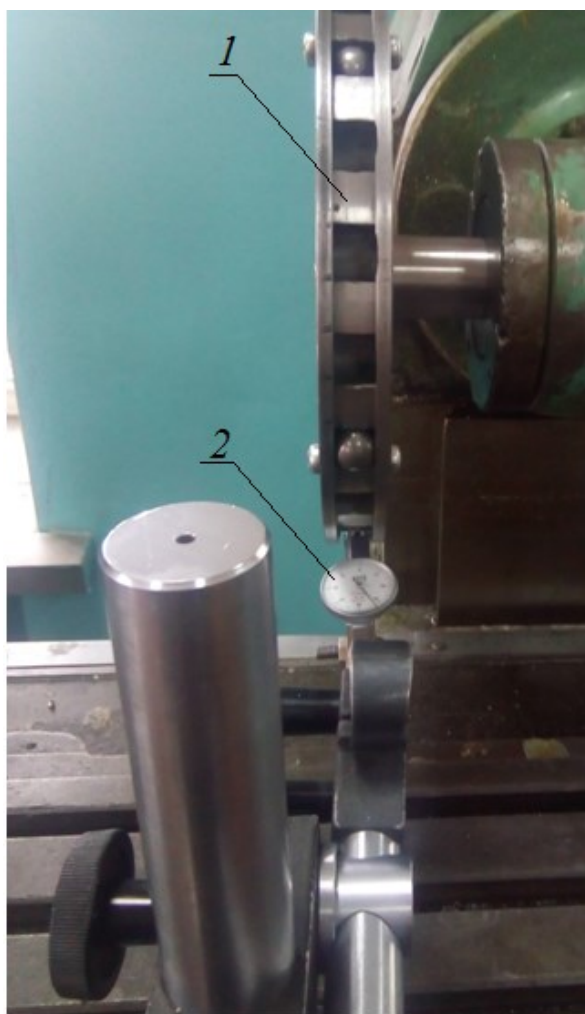


Рис. 3. Установка центробежно-ударного упрочнителя на станке: 1 – опытный инструмент, 2 – индикатор на стойке
Fig. 3. Installation of the centrifugal impact peening tool on the machine tool: 1 – pilot instrument, 2 – stand indicator

Таблица 1. Зависимость ширины следов упрочнения от режимов обработки ротационно-ударным инструментом
Table 1. Correlation between the width of peening dents and peening process modes

S_{np} , мм/мин	n , об/мин	k	Ширина дорожки упрочнения в трех точках, мм			Средняя арифметическая ширина упрочнения, мм
			1	2	3	
13	410	2	0,6	0,6	0,65	0,62
26	410	1	0,5	0,45	0,55	0,50
42	410	1	0,45	0,5	0,55	0,50
13	315	1	0,55	0,35	0,6	0,50
26	410	2	0,8	0,6	0,75	0,72
42	315	2	0,65	0,6	0,4	0,55
42	410	2	0,9	0,7	0,75	0,78
13	410	1	0,6	0,55	0,7	0,62

а перемещался с плоскошлифовального станка 3Г71М на стол фрезерного станка вместе с тисами. Натяг i центробежно-ударной обработки был принят равным 0,25 мм. Ширина дорожки упрочнения измерялась лупой Бринелля – микроскопом измерительным МБП-2 с ценой деления 0,05 мм в трех местах. Для выявления влияния режимов обработки на ширину дорожки упрочнения в ходе эксперимента менялись частота вращения упрочнителя n , равная 315 и 410 об/мин,

и продольная подача S_{np} : 13, 26, 42 мм/мин, а также количество ходов k с разной кратностью приложения нагрузки. Количество повторений – 3. Результаты измерения сведены в табл. 1.

Для поиска следов обработки лупой Бринелля они выполнены с промежутками, превышающими ширину упрочнения. Сфотографированные следы упрочнения имеют различия в оттенках (рис. 4). Наиболее выделяются следы 2 при обработке с подачей $S_{np} = 13$ мм/мин при частоте вращения 410 об/мин

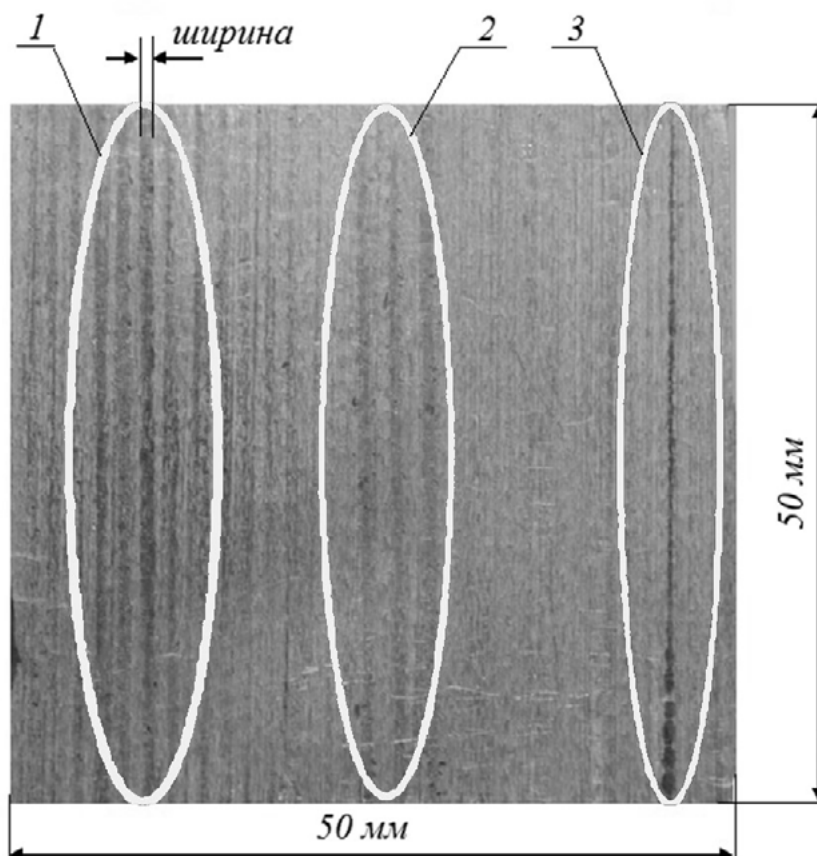


Рис. 4. Ширина следов упрочнения: 1 – $i = 0,25$ мм, $S_{np} = 26$ и 42 мм/мин, $n = 410$ об/мин, $k = 2$; 2 – $i = 0,25$ мм, $S_{np} = 13$ мм/мин, $n = 410$ об/мин, $k = 2$; 3 – $i = 0,5$ мм, $S_{np} = 42$ мм/мин, $n = 410$ об/мин, $k = 1$
Fig. 4. Peening indentation width: 1 – $i = 0.25$ mm, $S_{np} = 26$ u 42 mm/min, $n = 410$ rev/min, $k = 2$; 2 – $i = 0.25$ mm, $S_{np} = 13$ mm/min, $n = 410$ rev/min, $k = 2$; 3 – $i = 0.5$ mm, $S_{np} = 42$ mm/min, $n = 410$ rev/min, $k = 1$

за два хода. Хорошо видны на фото дорожки упрочнения 1 на режиме: $S_{пр} = 26$ и 42 мм/мин, $n = 410$ об/мин при $k = 2$. Однако увеличение числа проходов ведет лишь к плотности покрытий отпечатками (четкости следа), но не влияет на ширину обработанной поверхности. Из табл. 1 следует, что ширина дорожки упрочнения не превышает $0,7$ мм. Таким образом, перемещение в направлении поперечной подачи принято $0,5$ мм, позволяющее добиться равномерного покрытия поверхности следами отпечатков. Кроме того, проверено предположение, что величина натяга принципиально не влияет на ширину следа. Для чего была получена дорожка упрочнения 3 при $i = 0,5$ мм, $S_{пр} = 42$ мм/мин, $n = 410$ об/мин и $k = 1$.

Для определения влияния конструктивных особенностей инструмента и технологических параметров обработки на величину упрочнения используются современные конечно-элементные программные продукты на основе математических моделей процессов, о чем свидетельствуют работы [18, 19], которые из-за упрощения модели и пренебрежения некоторыми влияющими факторами могут приводить к расхождению расчетных и опытных значений или же к отличающимся зависимостям. В некоторых случаях результаты численного эксперимента, которые, безусловно, можно выполнить в большем

объеме, приводят к нестыковкам с общепринятыми физическими закономерностями [20]. Авторами был проведен натурный эксперимент и регрессионный анализ, что позволяет сохранить природу физических закономерностей и их математическое описание.

В качестве зависимой переменной изучалась микротвердость без изменения ее по глубине, которую определяли на ПМТ-3 четырехгранной пирамидой при нагрузке 100 г. Измерения повторяли три раза в различных зонах обработки, которые имели ширину 5 мм. В эксперименте неизменными были приняты исходная микротвердость, равная 160 HV $0,1$ по ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007³ на поверхности образца из Д16Т. Для проверки влияния кратности приложения нагрузки и касательной скорости шарика продольная подача задавалась равной $S = 26$ мм/мин с поперечной подачей $S_{пол} = 0,5$ мм/ход, а также еще в двух вариантах – 42 мм/мин с поперечной подачей $S_{пол} = 0,5$ мм/ход и двойной ход, что соответствует $k = 1$ и 2 . Производительность при этом менялась, что позволяло оценить наиболее предпочтительные значения подачи. Кроме того, оценивалось изменение микротвердости для разной интенсивности воздействия процесса центробежно-ударной обработки. Для этого упрочнение дополнительно велось и с величиной натяга $i = 0,5$ мм, а также при частоте

Таблица 2. Экспериментальные значения микротвердости образца из Д16Т на изучаемых режимах обработки ротационно-ударным упрочнителем

Table 2. Experimental values of D16T sample microhardness based on the researched centrifugal impact peening process modes

№ опыта	Режимы обработки				Микротвердость поверхности			Средняя арифметическая микротвердость
	$S_{пр}$, мм/мин	n , об/мин	k	i , мм	1	2	3	
1	315	26	1	0,25	169	177	173	173
2	315	42	1	0,25	159	167	162	162,7
3	315	42	2	0,25	157	163	182	167,3
4	315	42	1	0,5	240	237	327	238
5	410	26	1	0,25	198	182	181	187
6	410	42	1	0,25	179	160	173	170,7
7	410	42	2	0,25	193	184	189,5	188,8
8	410	42	1	0,5	249	244	244	245,7
9	500	26	1	0,25	209	237	223	223
10	500	42	1	0,25	201	202	182	195
11	500	42	2	0,25	198	200	234	210,7
12	500	42	1	0,5	264	256	249	256,3

³ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007. Металлы и сплавы. Измерение твердости по Виккерсу М.: Стандартинформ, 2008.

вращения упрочнителя от 315 до 500 об/мин.

Результаты измерения микротвердости на поверхности образца, ее средняя величина и значения контролируемых факторов сведены в табл. 2. Шероховатость после обработки была менее $Ra3,2$, что не требует зачистки для некоторых поверхностей деталей.

Экспериментальные данные представлены в столбиковой диаграмме (рис. 5), из которой видно влияние каждого контролируемого фактора, установленного на изучаемых уровнях, на изменение величины микротвердости поверхности упрочненного образца из Д16Т. Глубина измененной микротвердости для натяга $i = 0,25$ мм не превышает 0,5 мм. Такой припуск удалялся с образцов после проведения серии опытов, а контроль исходной микротвердости позволял удостовериться, что среднее значение неизменно близко к 160 HV 0,1.

При задании поперечной подачи на одинарный и двойной ходы (нечетные номера опытов в табл. 2) при равной кратности приложения нагрузки с сохранением одинаковой производительности не было выявлено существенного изменения микротвердости. Все изменения находятся в пределах статистической погрешности, так как критерий Стьюдента показал значение t -критерия меньше критического, следовательно, средние значения микротвердости

не различаются. Общая средняя микротвердость $\bar{H}_\mu$ для варианта задания поперечной подачи на одинарный ход (опыты 1, 5 и 9) равна 194,3 HV 0,1, а для задания поперечной подачи на двойной ход (опыты 3, 7 и 11) – 188,9 HV 0,1 при стандартной ошибке $\pm 7,5$ HV 0,1.

Однако прослеживается влияние значения продольной подачи $S_{пр}$ и частоты вращения упрочнителя n . Например, отмечен рост поверхностной микротвердости в зависимости от увеличения частоты вращения инструмента. При постоянном натяге $i = 0,25$ мм повышение микротвердости наблюдалось со значения 167,7 HV 0,1 для среднего по опытам 1–3 до 209,6 HV 0,1 для среднего по опытам 9–11, что видно по рис. 5.

Это влияние было оценено регрессионным уравнением для условного математического

Таблица 3. Результаты дисперсионного анализа ANOVA различий средней микротвердости поверхности при варьировании n и $S_{пр}$

Table 3. Analysis of variance (ANOVA) results for average surface microhardness with varied n and $S_{пр}$

Источник вариации	f	SS	MS	F-отношение
n	2	5451,4	2725,7	30,3
$S_{пр}$	1	1494,2	1494,2	16,6
$S_{пр \cdot n}$	2	242,1	121,1	1,3

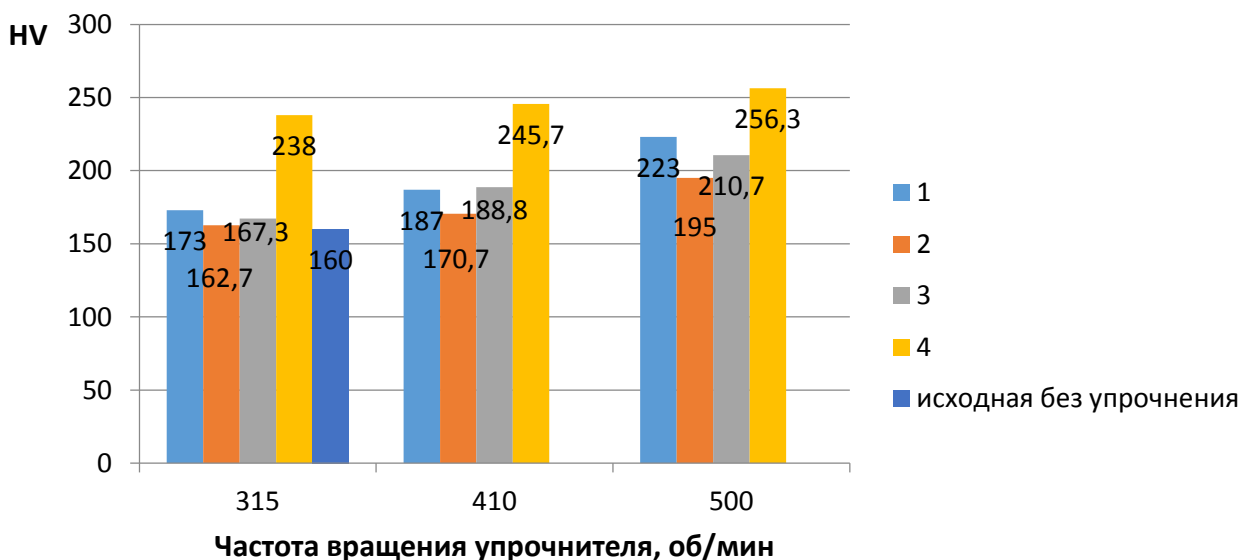


Рис. 5. Изменение поверхностной микротвердости детали из Д16Т по сравнению с исходной для различных режимов упрочнения. Режим: 1 – $S_{пр} = 25$ мм/мин, $k = 1$, $i = 0,25$ мм; 2 – $S_{пр} = 42$ мм/мин, $k = 1$, $i = 0,25$ мм; 3 – $S_{пр} = 42$ мм/мин, $k = 2$, $i = 0,25$ мм; 4 – $S_{пр} = 42$ мм/мин, $k = 1$, $i = 0,5$ мм

Fig. 5. Variation of D16T part surface microhardness as compared with original one for different peening modes. Mode: 1 – $S_{пр} = 25$ mm/min, $k = 1$, $i = 0.25$ mm; 2 – $S_{пр} = 42$ mm/min, $k = 1$, $i = 0.25$ mm; 3 – $S_{пр} = 42$ mm/min, $k = 2$, $i = 0.25$ mm; 4 – $S_{пр} = 42$ mm/min, $k = 1$, $i = 0.5$ mm

Таблица 4. Результаты дисперсионного анализа ANOVA различий средней микротвердости поверхности при варьировании n и i **Table 4.** Analysis of variance (ANOVA) results for average surface microhardness with varied n and i

Источник вариации	f	SS	MS	F-отношение
n	2	2018,8	1009,4	19,84
i	1	22401,4	22401,4	440,20
$i*n$	2	191,4	95,7	1,88
Ошибка	12	610,7	50,9	–
Всего	17	25222,3	–	–

ожидания исследуемой микротвердости, имеющего линейный вид:

$$H_{\mu} = b_0 + b_1 n + b_2 S_{np}.$$

Используя данные табл. 2, была построена матрица в ПО Statistica и выполнен регрессионный и дисперсионный анализ с целью поиска и оценки этой связи. Проведенный дисперсионный анализ показывает явную зависимость от двух исследуемых факторов (выделено в табл. 3) и отсутствие значимого влияния на среднюю микротвердость взаимодействия.

Отметим, что вклад частоты вращения упрочнителя n в изменение средней микротвердости выше, чем для S_{np} , так как F -отношения для продольной подачи меньше, что видно в табл. 3. Это подтверждают и рассчитанные стандартизованные коэффициенты β -регрессии, при этом влияние этих факторов противоположное, что согласуется с физическими представлениями о процессе – энергия удара i , следовательно, микротвердость возрастают с увеличением частоты вращения, а кратность приложения нагрузки n , следовательно, микротвердость снижаются при увеличении подачи. Декларируемое для практических расчетов регрессионное уравнение имеет вид:

$$H_{\mu} = 136,7 + 0,2n - 1,2S_{np}.$$

Кроме того, в ходе экспериментов было отмечено сильное влияние технологического натяга i в системе инструмент–деталь на поверхностную микротвердость, что видно из рис. 5, так как все значения изучаемой переменной при $i = 0,5$ мм больше для всех задаваемых в эксперименте частот вращения. Зависимость от натяга оценена линейным регрессионным уравнением с двумя объясняющими переменными – частотой вращения n и натягом i как превалирующими по влиянию факторами. Результаты дисперсионного анализа приведены в табл. 4.

Отмечается, что влияние натяга на измен-

чивость микротвердости выше (см. табл. 4), чем влияние подачи в несколько раз. F -отношения, соответственно, равны 440,2 и 16,6 при одинаковых степенях свободы. Так, при изменении подачи S_{np} рост микротвердости в 3,5 раза ниже по сравнению с изменением натяга, так как осредненные значения микротвердости по опытам 2, 6 и 10 возросли на величину 70,5 HV для опытов 4, 8 и 12, в которых менялась величина натяга. Стандартизованные коэффициенты β для предикторов n и i равны, соответственно, 0,28 и 0,94, что предопределяет назначение натяга как первого технологического фактора из трех изучаемых. Целесообразно оценить изменение угла встречи шарика с обрабатываемой поверхностью, который является важным показателем упрочнения, на примере дробеобработки.

Уравнение регрессии, найденное для этих переменных с коэффициентом детерминации, равным 0,97, для практических задач будет иметь вид:

$$H_{\mu} = 51,9 + 0,13n + 280i.$$

Оба найденных уравнения регрессии значимы и адекватны, что подтверждается высокими значениями критерия Фишера.

На основе прогнозируемых величин представим зависимость поверхности отклика в ПО Statistica. Отклик, представленный в виде поверхности предсказанной микротвердости для полученного регрессионного уравнения, показал следующее: интенсификация ударного и силового воздействия за счет увеличения n и i вызывает рост прогнозируемой величины микротвердости поверхности (рис. 6); этот рост в большей степени обусловлен изменением натяга в системе инструмент–деталь.

Прогнозируемое увеличение поверхностной микротвердости составляет 38,5% относительно исходной в исследуемой области экспериментирования. Однако следует отметить краевые дефекты в виде забоин на входе инструмента при максимальных значениях натяга и частоты вращения, которые требуют зачистки.

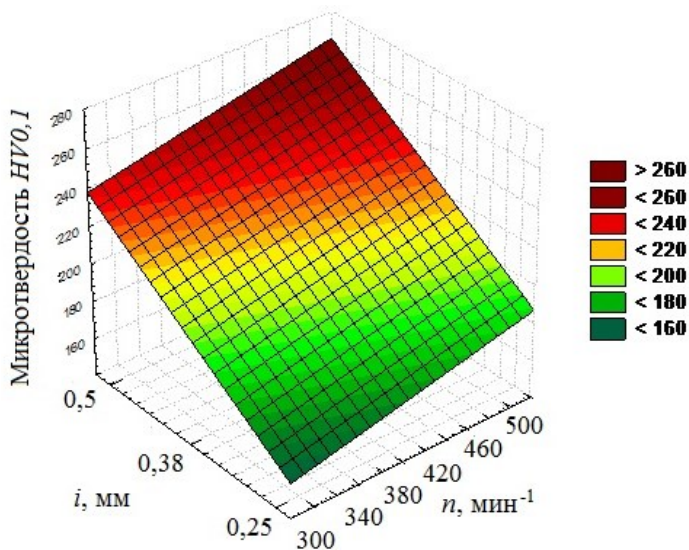


Рис. 6. Влияние частоты вращения упрочнителя n и натяга i на поверхность отклика микротвердости HV 0,1. Режим – $S_{пр} = 42$ мм/мин, $S_{поп} = 0,5$ мм/ход

Fig. 6. Influence of the peening tool rotation frequency n and interference i on the response surface of microhardness HV 0.1. Mode – $S_{пр} = 42$ mm/min, $S_{поп} = 0.5$ mm/singular stroke

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опытный образец спроектированного инструмента позволяет выполнять обработку как на станках с фрезерной, расточной, так и шлифовальной групп с ЧПУ за счет унифицированного узла крепления. Это обеспечивает достаточную технологическую гибкость процесса и позволяет ориентировать его как на

плоскости, так и на радиусы сопряжения. Центробежно-ударный упрочнитель с диаметром шарика 15 мм формирует следы на поверхности алюминиевой детали из Д16Т в виде отпечатков с шириной не более 0,7 мм, что определяет величину поперечной подачи равную $S_{поп} = 0,5$ мм, которую можно выполнять на ход или на двойной ход. Поверхностная микротвердость после обработки ротационным упрочнителем возрастает. Данное увеличение в большей степени зависит от технологического натяга и в меньшей степени от частоты вращения инструмента, которые рекомендуется увеличивать. Увеличение натяга в два раза позволило добиться роста микротвердости на 70 HV 0,1 и на 42 HV 0,1 при увеличении частоты вращения инструмента на 200 об/мин. Однако их необходимо назначать с учетом работоспособности конструкции упрочнителя. Так, при частоте вращения экспериментального инструмента 500 об/мин при натяге $i = 0,5$ мм возникают нежелательные вибрации и разбивка гнезда под шарик. Даже изготовление их из стали 30ХГСА с термообработкой до HRC 38 не позволяет повысить ресурс инструмента. Слабо влияющим фактором является продольная подача. Обработка с подачей 42 мм/мин при задании поперечной подачи на ход ведет к снижению величины упрочнения из-за недостаточного количества ударов на единицу площади поверхности.

Список источников

1. Chan Wai Luen, Cheng Henry Kuo Feng. Hammer Peening technology – the past, present, and future // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. Vol. 118. P. 683–701. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07993-5>.
2. Pfeiffer S., Fiedler M., Bergelt T., Kolouch M., Putz M., Wagner M. F-X. On the correlation of hammer-peened surfaces and process, material and geometry parameters // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2019. Vol. 480. P. 012021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/480/1/012021>.
3. Matuszak J., Zaleski K., Skoczylas A., Ciecielag K., Kecik K. Influence of semi-random and regular shot peening on selected surface layer properties of aluminum alloy // Materials. 2021. Vol. 14. Iss. 24. P. 7620. <https://doi.org/10.3390/ma14247620>.
4. Mannens R., Uhlmann L., Feuerhack A., Bergs T. Energy-dependent surface integrity of stainless steel AISI 304 after robot-based machine hammer peening // Forming the Future. The Minerals, Metals & Materials Series. 2021. P. 1863–1877. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75381-8_156.
5. Meyer D., Hettig M., Mensching N. Pulsed mechanical surface treatment - an approach to combine the advantages of shot peening, deep rolling, and machine hammer peening // Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2021. Vol. 5. Iss. 3. P. 98. <https://doi.org/10.3390/jmmp5030098>.
6. Neto L., Williams S., Ding J., Hönnige J., Martina F. Mechanical properties enhancement of additive manufactured Ti-6Al-4V by machine hammer peening // Advanced Surface Enhancement. INCASE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering / eds. S. Itoh, S. Shukla. Singapore: Springer, 2020. P. 121–132. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0054-1_13.
7. Amdouni H., Bouzaiene H., Montagne A., Nasri M., Iost A. Modeling and optimization of a ball-burnished aluminum alloy flat surface with a crossed strategy based on response surface methodology // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. Vol. 88. P. 801–814. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8817-8>.
8. Ferencsik V., Varga G. Examination of surface state-change on diamond burnished aluminium components. In: Proceedings of the International Symposium for Production Research 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering / eds. N. Durakbasa, M. Gençyılmaz. Cham: Springer, 2020. P. 535–544. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31343-2_47.
9. Пашков А.Е., Ле Чи Винь, Нгуен Тхе Хоанг, Блудов В.В., Тюньков В.В. Экспериментальное определение зависимости степени покрытия при дробеударном формообразовании от режимов обработки // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. Т. 23. № 6. С. 1052–1060. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1052-1060>.

10. Denti L., Sola A. On the effectiveness of different surface finishing techniques on A357.0 parts produced by laser-based powder bed fusion: surface roughness and fatigue strength // *Metals*. 2019. Vol. 9. Iss.12. P. 1284. <https://doi.org/10.3390/met9121284>.
11. Ferreira N., Jesus J.S., Ferreira J.A.M., Capela C., Costa J.M., Batista A.C. Effect of bead characteristics on the fatigue life of shot peened Al 7475-T7351 specimens // *International Journal of Fatigue*. 2020. Vol. 134. P. 105521. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105521>.
12. Ullah H., Ullah B., Rauf A., Muhammad R. Dynamic finite element analysis of shot peening process of 2618-T61 aluminium alloy // *Scientia Iranica. Transactions B: Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 26. Iss. 3. P. 1378–1387. <https://doi.org/10.24200/SCI.2018.5483.1302>.
13. Liu Yangfang, Cao Yang, Zhou Hao, Chen Xuefei, Liu Ying, Xiao Lirong, et al. Mechanical properties and microstructures of commercial-purity aluminum processed by rotational accelerated shot peening plus cold rolling // *Advanced Engineering Materials*. 2022. Vol. 22. Iss. 1. P. 1900478. <https://doi.org/10.1002/adem.201900478>.
14. Abeens M., Muruganandhan R., Thirumavalavan K. Comparative analysis of different surface modification processes on AA 7075 T651 // *International Conference on Materials Engineering and Characterization. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019. Vol. 574. P. 012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/574/1/012018>.
15. Feldmann G., Wong Chow Cher, Wei Wang, Haubold T. Application of vibropeening on aero – engine component // *Procedia CIRP*. 2014. Vol. 13. P. 423–428. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.04.072>.
16. Soyama H., Saito K., Saka M. Improvement of fatigue strength of aluminum alloy by cavitation shotless peening // *Journal of Engineering Materials and Technology*. 2002. Vol. 124. Iss. 2. P. 135–139. <https://doi.org/10.1115/1.1447926>.
17. Шнейдер Ю.Г., Маккавеев Е.П. Образование регулярного микрорельефа способом ротационно-ударного деформирования // *Станки и инструмент*. 1981. № 7. С. 31–33.
18. Zhang Jiabin, Lu Shihong, Zhang Tao, Xu Gang, Zhou Zhen. An analytical model to study of potential effects on component elongation in shot peening // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 97. P. 3299–3310. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2201-9>.
19. Gallitelli D., Boyer V., Gelineau M., Colaitis Y., Rouhaud E., Retraint D., et al. Simulation of shot peening: from process parameters to residual stress fields in a structure // *Comptes Rendus Mécanique*. 2016. Vol. 344. Iss. 4-5. P. 355–374. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2016.02.006>.
20. Luk-Cyr J., El-Bawab R., Champiaud H., Lanteigne J., Vadean A. Sequential approximate optimization of industrial hammer peening using finite element simulations // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2017. Vol. 55. P. 767–778. <https://doi.org/10.1007/s00158-016-1538-7>.

References

1. Chan Wai Luen, Cheng Henry Kuo Feng. Hammer peening technology – the past, present, and future. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022;118:683-701. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07993-5>.
2. Pfeiffer S., Fiedler M., Bergelt T., Kolouch M., Putz M., Wagner M. F-X. On the correlation of hammer-peened surfaces and process, material and geometry parameters. *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019;480:012021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/480/1/012021>.
3. Matuszak J., Zaleski K., Skoczylas A., Ciecielag K., Kecik K. Influence of semi-random and regular shot peening on selected surface layer properties of aluminum alloy. *Materials*. 2021;14(24):7620. <https://doi.org/10.3390/ma14247620>.
4. Mannens R., Uhlmann L., Feuerhack A., Bergs T. Energy-dependent surface integrity of stainless steel AISI 304 after robot-based machine hammer peening. *Forming the Future. The Minerals, Metals & Materials Series*. 2021;1863-1877. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75381-8_156.
5. Meyer D., Hettig M., Mensching N. Pulsed mechanical surface treatment – an approach to combine the advantages of shot peening, deep rolling, and machine hammer peening. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2021;5(3):98. <https://doi.org/10.3390/jmmp5030098>.
6. Neto L., Williams S., Ding J., Hönnige J., Martina F. Mechanical properties enhancement of additive manufactured Ti-6Al-4V by machine hammer peening. In: Itoh S., Shukla S. (eds.). *Advanced Surface Enhancement. INCASE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Singapore: Springer; 2020, p. 121-132. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0054-1_13.
7. Amdouni H., Bouzaïene H., Montagne A., Nasri M., Iost A. Modeling and optimization of a ball-burnished aluminum alloy flat surface with a crossed strategy based on response surface methodology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;88:801-814. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8817-8>.
8. Ferencsik V., Varga G. Examination of surface state-change on diamond burnished aluminium components. In: Durakbasa N., Gençylmaz M. (eds.). *Proceedings of the International Symposium for Production Research 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham: Springer; 2020, p. 535-544. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31343-2_47.
9. Pashkov A.E., Le Tri Vinh, Nguyen The Hoang, Bludov V.V., Tyunkov V.V. Experimental determination of coverage degree dependence on processing modes at shot peen forming. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(6):1052-1060. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1052-1060>.
10. Denti L., Sola A. On the effectiveness of different surface finishing techniques on A357.0 parts produced by laser-based powder bed fusion: surface roughness and fatigue strength. *Metals*. 2019;9(12):1284. <https://doi.org/10.3390/met9121284>.
11. Ferreira N., Jesus J.S., Ferreira J.A.M., Capela C., Costa J.M., Batista A.C. Effect of bead characteristics on the fatigue life of shot peened Al 7475-T7351 specimens. *International Journal of Fatigue*. 2020;134:105521. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105521>.

12. Ullah H., Ullah B., Rauf A., Muhammad R. Dynamic finite element analysis of shot peening process of 2618-T61 aluminium alloy. *Scientia Iranica. Transactions B: Mechanical Engineering*. 2019;26(3):1378-1387. <https://doi.org/10.24200/SCI.2018.5483.1302>.
13. Liu Yangfang, Cao Yang, Zhou Hao, Chen Xuefei, Liu Ying, Xiao Lirong, et al. Mechanical properties and microstructures of commercial-purity aluminum processed by rotational accelerated shot peening plus cold rolling. *Advanced Engineering Materials*. 2022;22(1):1900478. <https://doi.org/10.1002/adem.201900478>.
14. Abeens M., Muruganandhan R., Thirumavalavan K. Comparative analysis of different surface modification processes on AA 7075 T651. In: *International Conference on Materials Engineering and Characterization. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019;574:012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/574/1/012018>.
15. Feldmann G., Wong Chow Cher, Wei Wang, Haubold T. Application of vibropeening on aero – engine component. *Procedia CIRP*. 2014;13:423-428. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.04.072>.
16. Soyama H., Saito K., Saka M. Improvement of fatigue strength of aluminum alloy by cavitation shotless peening. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 2002;124(2):135-139. <https://doi.org/10.1115/1.1447926>.
17. Shneider Yu.G., Makkaveev E.P. Forming regular microrelief by the method of centrifugal impact peening. *Stanki i instrument*. 1981;7:31-33. (In Russ.).
18. Zhang Jiabin, Lu Shihong, Zhang Tao, Xu Gang, Zhou Zhen. An analytical model to study of potential effects on component elongation in shot peening. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;97:3299-3310. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2201-9>.
19. Gallitelli D., Boyer V., Gelineau M., Colaitis Y., Rouhaud E., Retraint D., et al. Simulation of shot peening: from process parameters to residual stress fields in a structure. *Comptes Rendus Mécanique*. 2016;344(4-5):355-374. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2016.02.006>.
20. Luk-Cyr J., El-Bawab R., Champlaud H., Lanteigne J., Vadean A. Sequential approximate optimization of industrial hammer peening using finite element simulations. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2017;55:767-778. <https://doi.org/10.1007/s00158-016-1538-7>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**Казимиров Денис Юрьевич,**

к.т.н., доцент,
доцент кафедры технологии и оборудования
машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
✉ kazimirdenn@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6438-1525>

Исаченко Алексей Сергеевич,

к.т.н.,
доцент кафедры технологии
и оборудования машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
isachenkoas@ex.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0001-9522-3714>

Вклад авторов

Вклад каждого автора в подготовку публикации
равнозначный.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный
вариант рукописи.*

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 24.06.2023 г.; одобрена
после рецензирования 01.09.2023 г.; принята к публикации
04.12. 2023 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**Denis Yu. Kazimirov,**

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Technology
and Equipment for Machine-Building Production,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
✉ kazimirdenn@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6438-1525>

Aleksei S. Isachenko,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Technology
and Equipment for Machine-Building Production,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
isachenkoas@ex.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0001-9522-3714>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

*The final manuscript has been read and approved by all
the co-authors.*

Information about the article

The article was submitted 24.06.2023; approved
after reviewing 01.09.2023; accepted for publication
04.12.2023.