

МАШИНОСТРОЕНИЕ

DOI: 10.24412/2077-8481-2025-3-5-16

УДК 621.75

Е. В. ИЛЬЮШИНА, канд. техн. наук, доц.

Н. М. ЮШКЕВИЧ

В. С. КООВИТ

А. В. МУХА

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ТЕХНОЛОГИЯ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ПНЕВМОУДАРОМ ПОВЕРХНОСТЕЙ АЛЮМИНИЕВЫХ ЗАГОТОВОК

Аннотация

Рассмотрена технология упрочняющей обработки пневмоударом алюминиевых заготовок из сплавов Д16 и АК12. Представлены результаты экспериментальных исследований. Получены зависимости величины шероховатости обработанной поверхности от параметров процесса обработки. Проведена параметрическая оптимизация и получена математическая модель процесса.

Ключевые слова:

упрочнение поверхности, упрочняющая обработка пневмоударом, алюминиевые сплавы, наклеп, микротвердость.

Для цитирования:

Технология упрочняющей обработки пневмоударом поверхностей алюминиевых заготовок / Е. В. Ильюшина, Н. М. Юшкевич, В. С. Коовит, А. В. Муха // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2025. – № 3 (88). – С. 5–16.

Введение

Современными эффективными направлениями повышения технологических и эксплуатационных характеристик алюминиевых сплавов являются: термическая обработка, лазерная обработка, нанесение различных видов пленок и покрытий, ультразвуковое упрочнение, нанотехнологии, а также поверхностное пластическое деформирование (ППД) [1–3]. Использование ППД для упрочнения алюминиевых сплавов показывает хорошие результаты и позволяет в несколько раз увеличить сопротивление усталости, износостойкость, контактную жесткость и микротвердость поверхности, повышая ресурс работы изделий из них [4, 5].

Недостаточное количество исследований ППД алюминиевых сплавов свидетельствует о сложностях, возникающих в процессе их обработки, которые обусловлены повышенной пластичностью данных материалов. Как следствие, процесс обработки становится неустойчивым и, в ряде случаев, приводит к адгезии материала на деформирующих инструментах и образованию неровностей на поверхности заготовки.

Актуальность повышения качества обработки плоских алюминиевых поверхностей методом поверхностного пластического деформирования не вызывает сомнений. Одним из перспективных решений этой задачи является использование технологии упрочняющей пневмоударной обработки [6]. Данный

метод предоставляет новые возможности для улучшения эксплуатационных свойств изготавливаемых деталей.

Технология пневмоударного упрочнения может эффективно применяться для деталей, изготовленных из деформируемых алюминиевых сплавов, используемых в конструкциях (например, Д16, Д1, Д19, ВД17, ВАД-1), а также для литейных сплавов, широко востребованных в станкостроении (АЛ2, АЛ4, АЛ9, АК5М2, АК12, АК7 и др.). Литые алюминиевые сплавы находят применение в узлах с возвратно-поступательным движением, таких как столы, ползуны и пиноли. Применение алюминиевых сплавов в производстве корпусных элементов и узлов трения ограничено их недостаточной твердостью и износостойкостью. В случае замены чугунных деталей на алюминиевые рекомендуется их упрочнение [7]. Однако есть сплавы (например, АК12), которые не упрочняются термической обработкой. Для повышения их эксплуатационных характеристик требуется модификация состава и улучшение качества поверхностного слоя изделий с помощью методов поверхностного пластического деформирования [8].

В области упрочняющей и отделочно-упрочняющей обработки пневмоударом имеется достаточно большой накопленный опыт по обработке заготовок разнообразной формы и конфигурации из разных материалов: сталей, чугунов, баббитов, бронз и др. [11]. Исследования, посвященные обработке алюминиевых сплавов, проведены пока только для марок Д16 и АК12. В работе представлены теоретические и экспериментальные результаты, полученные в этой области.

Следует отметить очевидные перспективы применения пневмоударной обработки для деталей из алюминиевых сплавов, связанные с небольшими силами деформирования, возникающими при ударе индентора (шара) по обрабатываемой поверхности, что имеет важное

значение для избежания изменения геометрической формы изделия при обработке неравножестких и маложестких плоских поверхностей заготовок.

Научная новизна работы состоит в результатах исследований влияния режимов упрочняющей пневмоударной обработки на качественные характеристики обработанных алюминиевых поверхностей, а также в установлении закономерностей такого влияния.

Сущность процесса упрочняющей обработки пневмоударом

Технология упрочняющей обработки пневмоударом основана на использовании импульсного кратковременного воздействия рабочих тел (шаров) на поверхность обрабатываемых заготовок. Для обработки используется вертикально-фрезерный станок, на столе которого базируется заготовка, а инструмент для упрочняющей обработки пневмоударом устанавливается в шпиндель, в котором отключено вращательное движение [6]. Особенностью инструмента является наличие в нем двух рядов шаров (приводящих и деформирующих), совершающих вращательные движения по круговой траектории. При этом приводящие шары, находясь в турбулентном потоке сжатого воздуха, задают ударные импульсы деформирующим шарам, которые также имеют многоосное вращение относительно собственного центра масс [9].

В процессе упрочняющей пневмоударной обработки деформирующие шары оказывают силовое воздействие на обрабатываемую поверхность, которое существенным образом отличается от традиционных жестких шаровых накатников [4]. За счет постоянного изменения направления удара шара по обрабатываемой поверхности при упрочняющей пневмоударной обработке имеет место возникновение эффекта Баушингера, который состоит в том, что каждая микрizona поверхностного слоя при

упрочнении испытывает давление в разных направлениях [10, 11]. В соответствии с теорией дислокаций это приводит к появлению в алюминиевом сплаве остаточных напряжений, которые постоянно изменяют знак нагрузки, что обуславливает снижение предела пропорциональности, упругости и текучести. Как следствие – металл легче деформируется. Для осуществления процесса деформирования требуются меньшие усилия, что позволяет уменьшить давление подводимого воздуха, необходимое для работы инструмента.

Деформирующие шары воздействуют на микронеровности исходной поверхности кратковременно в разных направлениях. Режим сложного автоколебательного движения приводит к значительному уменьшению силы пластической деформации, оставляя на поверхности микролунки и формируя нерегулярный микрорельеф. Глубина и диаметр лунок зависит от диаметра деформирующих шаров и кинетической энергии, сообщаемой им приводящими шарами. Степень перекрытия исходной поверхности микролунками зависит от скорости обработки (рис. 1).



Рис. 1. Алюминиевый образец, обработанный пневмоударным инструментом с различной степенью перекрытия исходной поверхности лунками

Малые усилия деформирования в процессе пневмоударной обработки способствуют деформационному упрочнению металла и образованию благоприятных пластических сдвигов в его слоях. Это позволяет значительно снизить разрушение поверхности по сравнению с такими технологическими процессами, как резание или шлифование. Уровень

остаточных напряжений в поверхностном слое и их концентрация уменьшается в сравнении с методами алмазного выплаживания и поверхностного накатывания жестким инструментом. В результате получается более качественная и устойчивая поверхность, что улучшает эксплуатационные характеристики алюминиевых заготовок и их долговечность.

Технологические возможности упрочняющей обработки пневмударом

Для проведения экспериментальных исследований подготовлены образцы:

– заготовки из деформируемого конструкционного алюминиевого сплава Д16 с размерами (длина 700 мм, ширина 100 мм, высота 25 мм). Исходная поверхность заготовок предварительно обработана фрезерованием ($Ra_{исх} = 2,80...3,20$ мкм);

– заготовки из литейного алюминиевого сплава АК12 с размерами (дли-

на 300 мм, ширина 80 мм, высота 10 мм). Исходная поверхность заготовок получена после прессования алюминия ($Ra_{исх} = 2,00...2,30$ мкм).

Обработку образцов проводили на вертикально-фрезерном станке JET.

Варьируемые параметры процесса обработки:

1) давление сжатого воздуха P в полости инструмента, МПа;

2) минутная подача стола станка S , мм/мин;

3) величина зазора h между заготовкой 1 и плоскостью основания инструмента 2, мм (рис. 2).

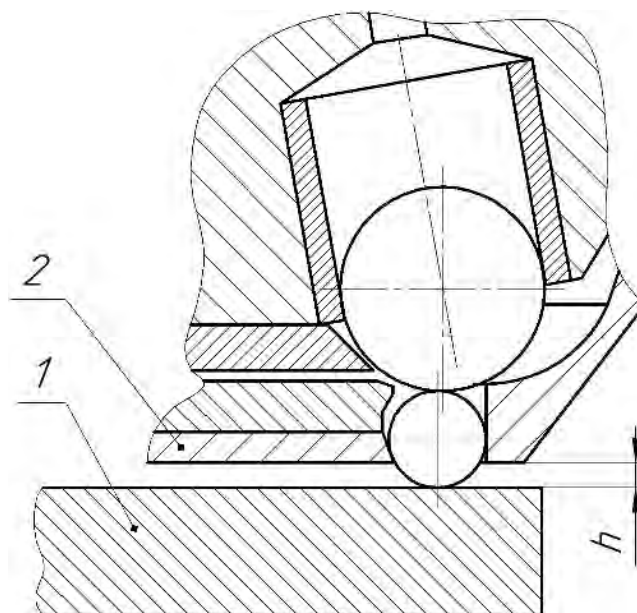


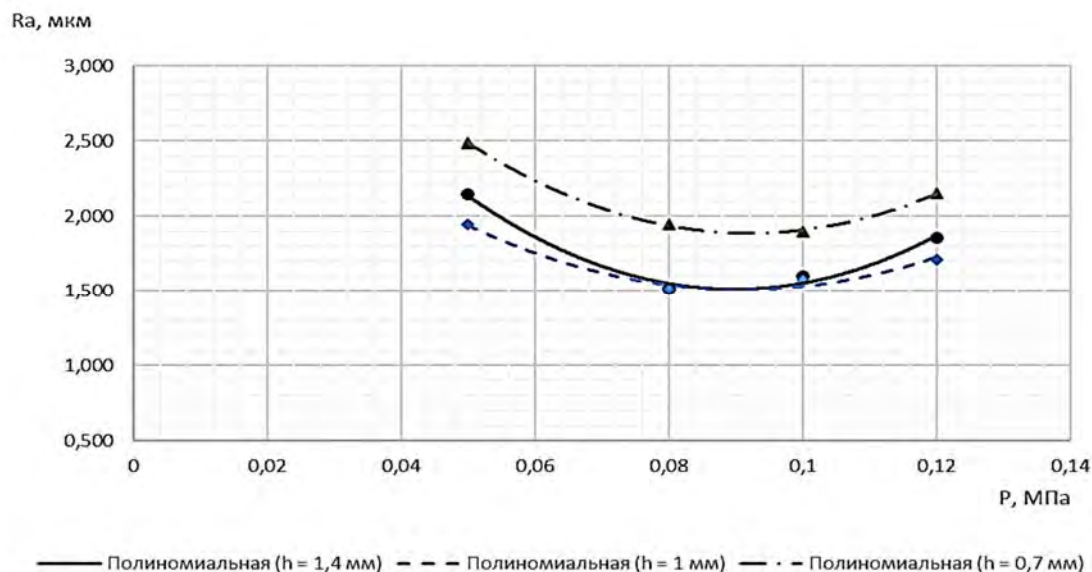
Рис. 2. Схема для определения величины зазора

Параметр давления сжатого воздуха, подаваемого к инструменту от пневмосистемы, выбираем в диапазоне от 0,05 до 0,15 МПа. Такие величины давления сжатого воздуха были выбраны исходя из возможностей компрессора ВК25Т-8-500Д и конструктивных параметров инструмента. Минутная подача стола станка варьировалась в диапазоне от 80 до 420 мм/мин. Значение величины зазора h выбирали в диапазоне от 0,5 до 1,4 мм, что обусловлено конструк-

цией инструмента. Шероховатость обработанной поверхности измеряли с помощью профилометра SurfTest SJ-210 Mitutoyo.

Получены графики зависимостей величины шероховатости обработанной поверхности от давления сжатого воздуха, подаваемого в инструмент (рис. 3). Их анализ показал, что параметр шероховатости обработанной поверхности Ra уменьшается с увеличением давления, но после отметки 0,10 МПа начинает возрастать.

а)



б)

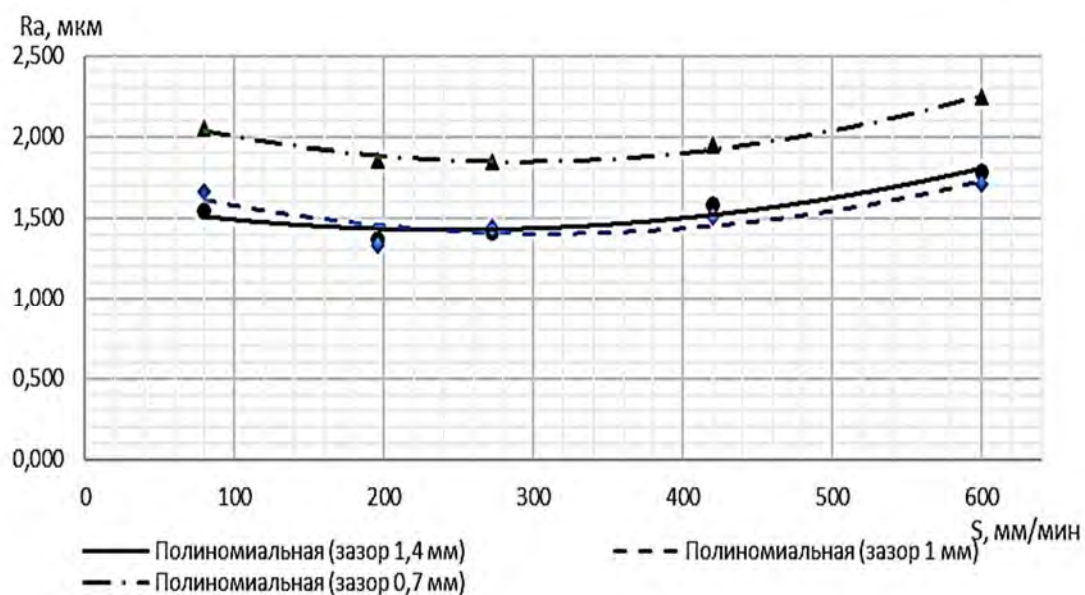


Рис. 3. Графики зависимости шероховатости обработанной поверхности R_a от величины давления сжатого воздуха P при $S = 272$ мм/мин: а – образец из сплава Д16; б – образец из сплава АК12

В результате проведенных экспериментальных исследований двух видов алюминиевых образцов получены графики зависимостей величины шероховатости обработанной поверхности от параметра минутной подачи при обработ-

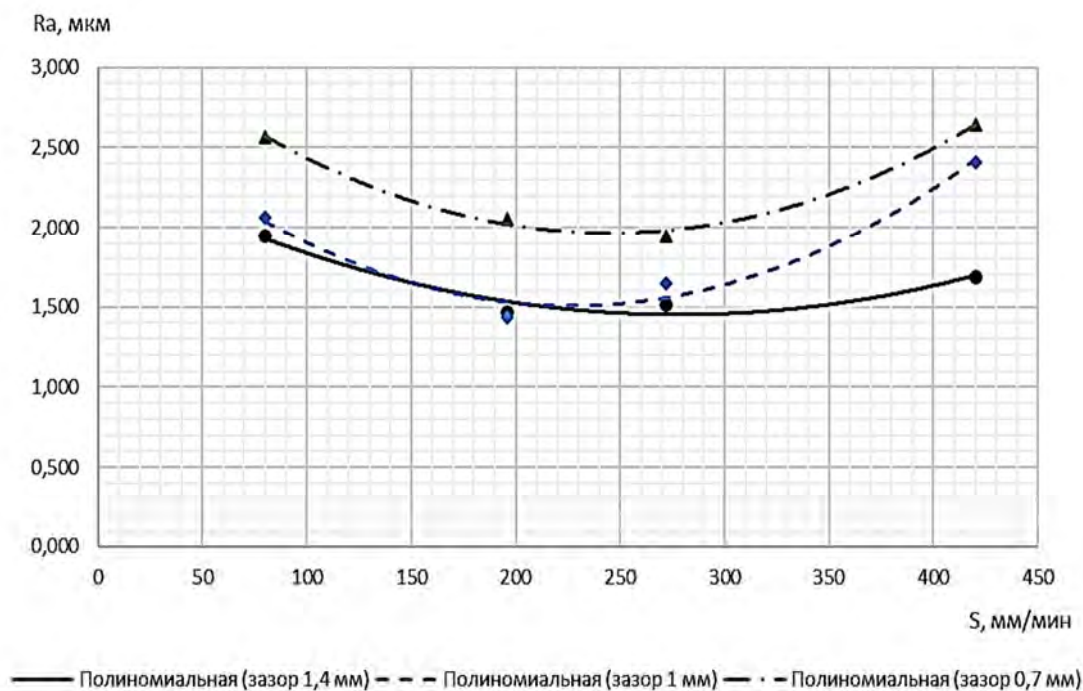
ке (рис. 4).

После проведения пневмоударной обработки на заготовках из двух видов алюминиевых сплавов наблюдается снижение исходной шероховатости, обра-

зуется новый нерегулярный микро-
рельеф в виде непрерывно расположен-
ных микролунок, основными параметра-
ми которого являются глубина мик-

роуглублений и их шаг (плотность
распределения).

а)



б)

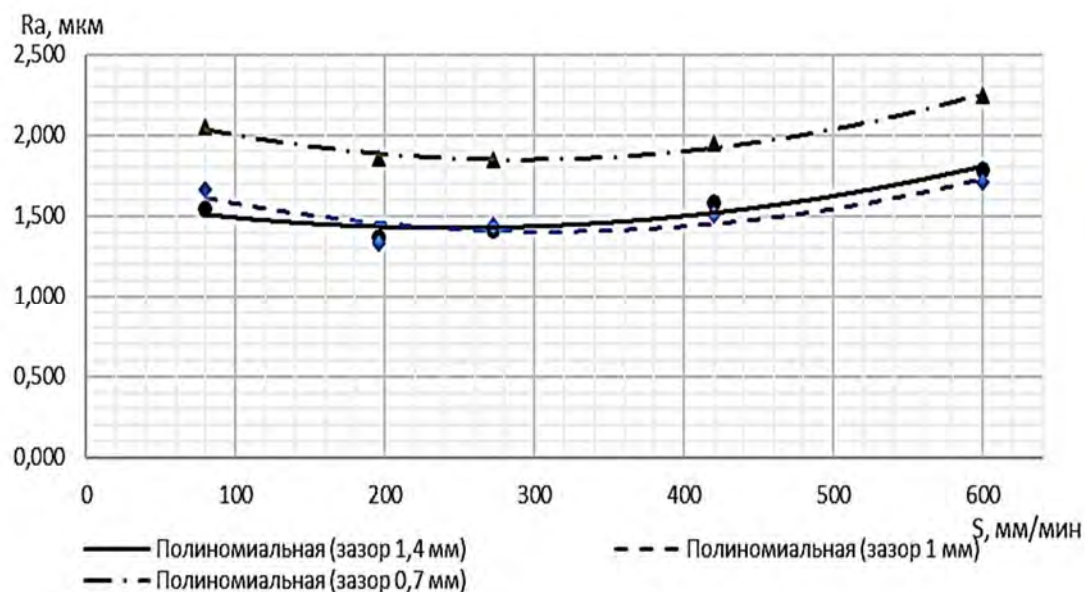


Рис. 4. Графики зависимости шероховатости обработанной поверхности Ra от величины минутной подачи S при $P = 0,10$ МПа: а – образец из сплава Д16; б – образец из сплава АК12

Величина шероховатости обработанной поверхности на заготовках из алюминиевого сплава Д16 при изменении минутной подачи стола станка составила $Ra = 1,40 \dots 2,60$ мкм, а для алюминиевого сплава АК12 – $Ra = 1,30 \dots 2,20$ мкм.

Установлено, что с увеличением минутной подачи параметр шероховатости обработанной поверхности Ra начинает снижаться, а затем возрастает. При этом замечено, что с увеличением минутной подачи плотность распределения лунок снижается (табл. 1).

Табл. 1. Изменение параметра шероховатости обработанной поверхности и плотности распределения лунок в зависимости от минутной подачи при $P = 0,10$ МПа

S, мм/мин	h = 1,4 мм		h = 1,0 мм		h = 0,7 мм	
	Ra среднее, мкм	Плотность лунок, %	Ra среднее, мкм	Плотность лунок, %	Ra среднее, мкм	Плотность лунок, %
Алюминиевый сплав Д16						
80	1,945	120...130	2,063	120...130	2,562	90...100
196	1,468	100	1,432	100	2,056	80...90
272	1,511	100	1,646	90...100	1,946	60...70
420	1,685	70...80	2,406	40...50	2,647	30...40
Алюминиевый сплав АК12						
80	1,545	110...120	1,663	110...120	2,051	110...120
196	1,368	100	1,332	100	1,856	100
272	1,411	100	1,446	90...100	1,846	80...100
420	1,585	70...90	1,506	70...80	1,947	70...80
600	1,785	40...50	1,706	40...50	2,247	20...30

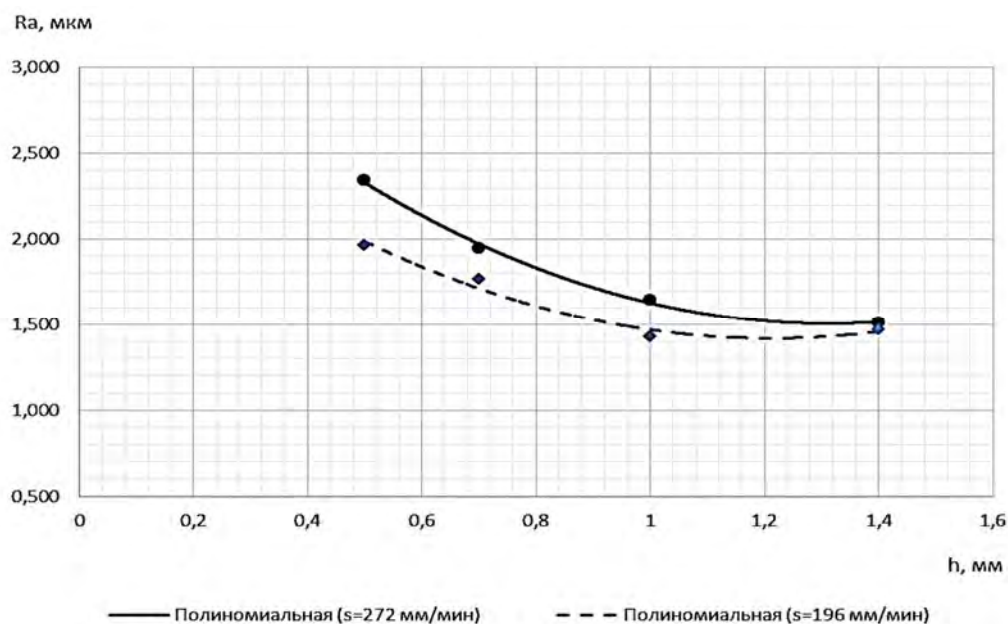
Проведен ряд экспериментальных исследований по упрочняющей пневмоударной обработке образцов заготовок с варьированием величины минутной подачи стола станка с заготовкой при давлении сжатого воздуха $P = 0,10$ МПа и разной величиной зазора h между заготовкой и плоскостью основания инструмента (рис. 5). Установлено, что с увеличением зазора h между заготовкой и плоскостью основания инструмента параметр шероховатости обработанной поверхности Ra снижается. Наилучшие результаты обработки отмечаются при величине зазора h от 1,0 до 1,4 мм.

Результатом проведения экспери-

ментальных исследований стала параметрическая оптимизация упрочняющей пневмоударной обработки. Порядок проведения факторного эксперимента и его результаты изложены в [12]. Получена математическая модель процесса, описывающая влияние величины давления сжатого воздуха, подачи стола станка и величины зазора между основанием инструмента и плоскостью заготовки на параметр шероховатости Ra обработанной алюминиевой поверхности при упрочняющей обработке пневмоударом:

$$Ra = 0,721 - 3,771P - 0,174h - 0,29 \cdot 10^{-4} S. \quad (1)$$

а)



б)

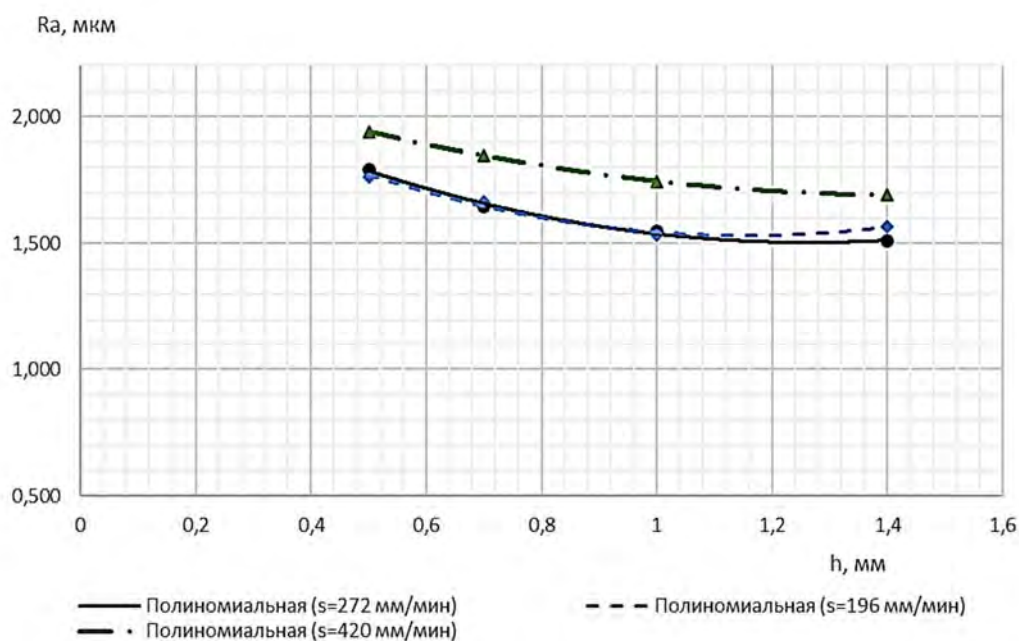


Рис. 5. Графики зависимости шероховатости обработанной поверхности Ra от величины зазора h при $P = 0,1$ МПа: а – образец из сплава Д16; б – образец из сплава АК12

Анализ уравнения регрессии в действительных величинах (1) показал, что модель адекватна и наибольшее

влияние на параметр шероховатости Ra обработанной поверхности оказывает давление сжатого воздуха, подводимое к

инструменту, а в меньшей степени – величина зазора между основанием инструмента и плоскостью заготовки. Минутная подача наименьшим образом влияет на процесс обработки, ее величина лишь сказывается на плотности распределения лунок по поверхности.

Исследования микротвердости образцов из литейного алюминиевого сплава АК12 после упрочняющей обработки пневмоударом

Исследования проводилось на опытных образцах размерами $10 \times 10 \times 10$ мм, изготовленных из алюминиевого сплава АК12 с исходной микротвердостью 70...85 HV. Поверхность заготовок получена после прессования алюминия

($Ra_{исх} = 2,00...2,30$ мкм), а затем подвергнута упрочняющей обработке пневмоударным инструментом, варьируя параметрами, с получением шероховатости поверхности $Ra = 1,30...2,20$ мкм.

Измерение микротвердости образцов проводили на микротвердомере Zwick Roell ZHV 1M по ГОСТ 9450–76. Прилагаемая нагрузка $HV = 0,05$. Микротвердость образцов определялась алмазным индентором – пирамидой Виккерса, выдержка определения отпечатка составляла 11 с для получения точного размера отпечатка. Результаты экспериментальных исследований в зависимости от различных параметров обработки позволили построить графики зависимостей (рис. 6–8).

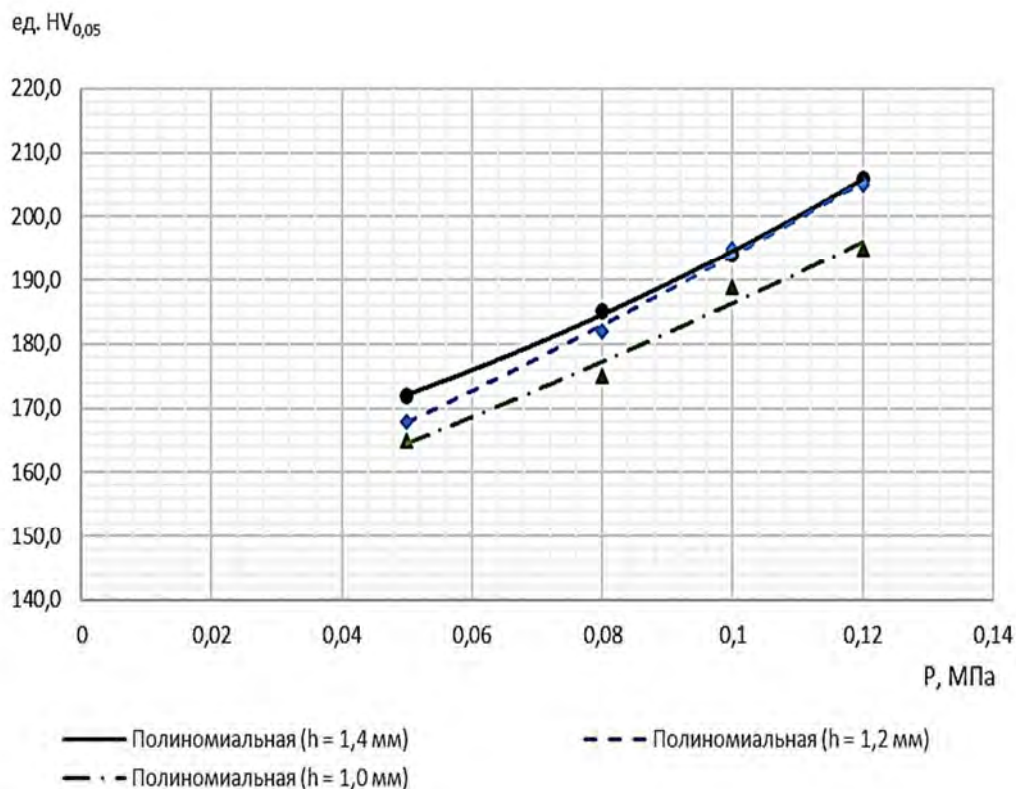


Рис. 6. График зависимости микротвердости обработанной поверхности от величины давления сжатого воздуха Р при $S = 272$ мм/мин

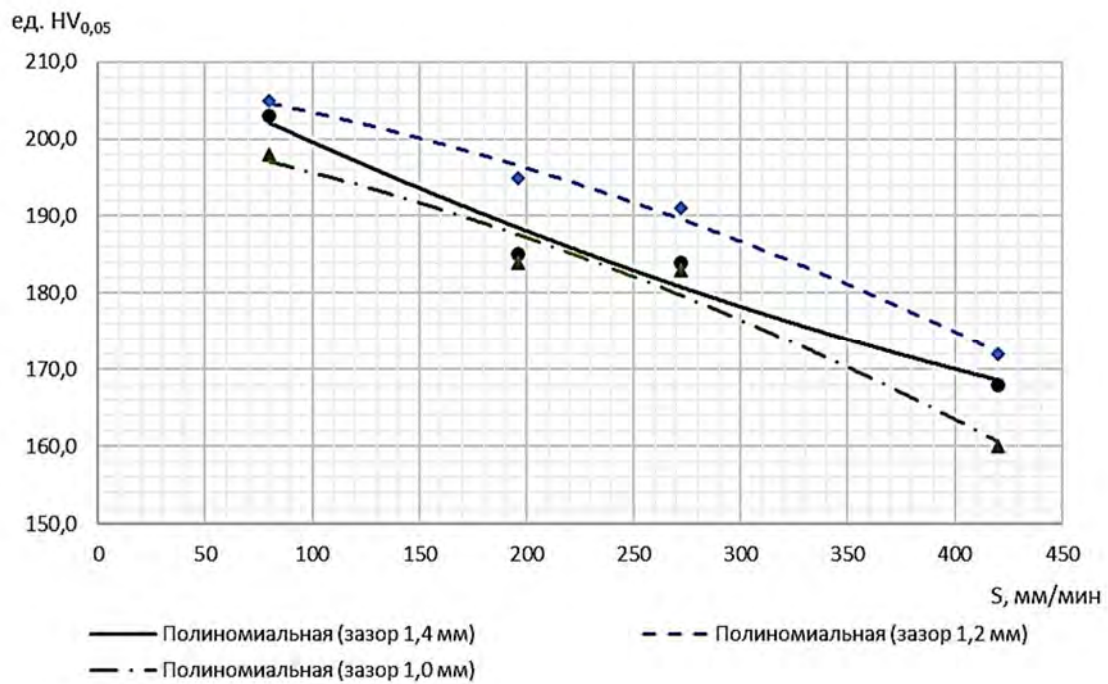


Рис. 7. График зависимости микротвердости обработанной поверхности от величины минута подачи S при $P = 0,08$ МПа

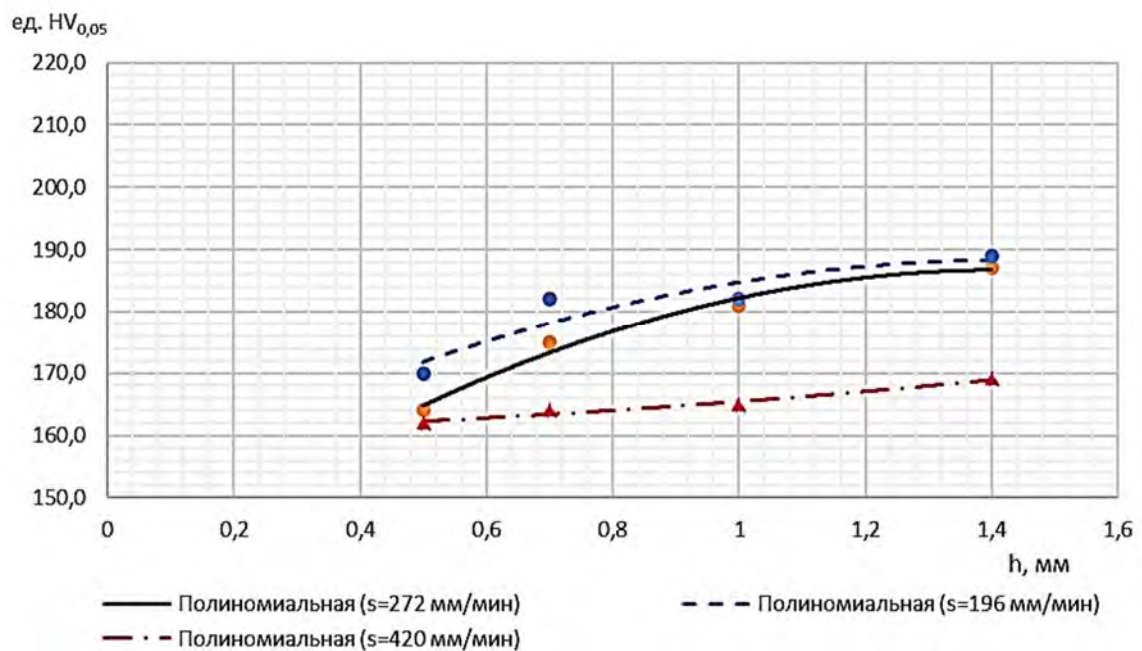


Рис. 8. График зависимости микротвердости обработанной поверхности от величины зазора h при $P = 0,08$ МПа

Измерения показали увеличение микротвердости образцов после упрочняющей обработки пневмоударом до 160...200 HV. На основании полученных графиков зависимости можно утверждать, что с увеличением величины зазора и давления, подаваемого в осевую полость инструмента, а также со снижением подачи стола станка микротвердость обработанной поверхности возрастает.

Сопоставив ранее проведенные исследования топографии поверхности после упрочняющей обработки пневмоударом [6], полученные зависимости по микротвердости поверхности и вышеописанные технологические возможности, можно рекомендовать оптимальные режимы для упрочняющей обработки алюминиевых сплавов Д16 и АК12. Для снижения шероховатости $Ra = 1,30...2,00$ мкм, увеличения микротвердости до 180...200 HV необходимо при упрочняющей обработке пневмоударом давление в инструменте устанавливать 0,08...0,10 МПа, зазор отрегулировать на величину 1,2...1,4 мм, работая с минутной подачей 200...300 мм/мин.

Выводы

1. Разработана технология упрочняющей обработки пневмоударом поверхностей заготовок из алюминиевых сплавов Д16 и АК12, позволяющая повысить микротвердость до 180...200 HV, снизить шероховатость до $Ra = 1,30...2,00$ мкм при следующих параметрах обработки: давление сжатого воздуха в инструменте 0,08...0,10 МПа, минутная подача стола станка 200...300 мм/мин, величина зазора между инструментом и плоскостью заготовки 1,2...1,4 мм.

2. Исследованы технологические возможности упрочняющей обработки пневмоударом. Установлено, что на снижение шероховатости обработанной поверхности образцов из алюминиевых сплавов Д16 и АК12 оказывает существенное влияние повышение давления сжатого воздуха в инструменте, в меньшей степени – увеличение величины зазора между инструментом и плоскостью заготовки. Минутная подача показывает минимальное влияние на процесс обработки, но ее возрастание выше 300 мм/мин снижает плотность распределения лунок, что является нежелательным при обработке.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Беляев, В. Н.** Обработка отверстий в деталях из алюминиевого сплава поверхностно-пластическим деформированием / В. Н. Беляев, А. М. Фирсов // Обработка металлов. – 2006. – № 1 (30). – С. 18–22.
2. **Лупкин, Б. В.** Упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием / Б. В. Лупкин, Н. С. Погребельный // Открытые информационные и компьютерные технологии. – 2013. – № 58. – С. 40–48.
3. Применение углеродных частиц в качестве добавок в электролит при высоковольтном электрохимическом оксидировании алюминий-кремниевых сплавов / Е. А. Степанова-Паршута, А. А. Изюмов, А. А. Паршута, И. П. Смягликов // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2019. – С. 304–310.
4. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: в 2 т. / А. Г. Суслов, В. Ю. Блюменштейн, Р. В. Гуров [и др.]; под общ. ред. А. Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2014. – Т. 1. – 480 с.
5. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: в 2 т. / А. Г. Суслов, А. П. Бабичев, А. В. Киричек [и др.]; под общ. ред. А. Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2014. – Т. 2. – 444 с.
6. **Ильюшина, Е. В.** Исследование технологических возможностей упрочняющей обработки пневмоударом плоских поверхностей алюминиевых заготовок / Е. В. Ильюшина, Н. М. Юшкевич // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 3 (76). – С. 30–41.

7. Проектирование металлорежущих станков и систем: справочник-учебник: в 3 т. Т. 2: Расчет и конструирование узлов и элементов станков / А. С. Проников, Е. И. Борисов, В. В. Бушуев [и др.]; под общ. ред. А. С. Проникова. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана; Машиностроение, 1995. – 320 с.
8. Способ упрочнения легких сплавов аэротермоакустической обработкой в авиа- и ракетостроении / М. С. Калугина, Е. Ю. Ремшев, Г. А. Данилин [и др.] // Вестник Московского авиационного института. – 2018. – Т. 25, № 2. – С. 230–239.
9. Технология финишной упрочняющей пневмовибродинамической обработки нежестких деталей / А. П. Минаков, И. Д. Камчицкая, Е. В. Ильюшина [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2016. – 294 с.
10. Фридман, Я. Б. Механические свойства материалов: в 2 ч. Ч. 1: Деформация и разрушение / Я. Б. Фридман. – М.: Машиностроение, 1974. – 472 с.
11. Линчевский, П. А. Совершенствование технологии обработки металлов резанием и пластическим деформированием с учетом использования эффекта Баушингера / П. А. Линчевский, С. В. Новожилов, М. Б. Кудряков // Труды Одесского политехнического университета. – 2008. – № 1–2. – С. 73–76.
12. Полнофакторный эксперимент для установления влияния режимов упрочняющей обработки пневмоударом на микротвердость поверхности / Е. В. Ильюшина, Н. М. Юшкевич, В. С. Коовит, А. В. Муха // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 24–25 апр. 2025 г. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2025. – С. 45–46.

Статья сдана в редакцию 24 июня 2025 года

Контакты:

sktb-pvdo@mail.ru (Ильюшина Елена Валерьевна);
ronami.yu@gmail.com (Юшкевич Надежда Михайловна);
koovit2020@mail.ru (Коовит Виктор Сергеевич);
babarok6time6@gmail.com (Муха Александр Викторович).

E. V. ILYUSHINA, N. M. YUSHKEVICH, V. S. KAAVIT, A. V. MUKHA

UTILIZING PNEUMATIC IMPACT FOR STRENGTHENING TREATMENT OF SURFACES OF ALUMINUM BILLETS

Abstract

The paper considers the technology of strengthening treatment of aluminum billets made of D16 and AK12 alloys by utilizing pneumatic impact. The results of experimental studies are presented. The dependencies between the roughness of the surface treated and the treatment process parameters have been obtained. Parametric optimization has been performed and a mathematical model of the process has been obtained.

Keywords:

surface strengthening, strengthening treatment by pneumatic impact, aluminum alloys, cold-work strengthening, microhardness.

For citation:

Utilizing pneumatic impact for strengthening treatment of surfaces of aluminum billets / E. V. Ilyushina, N. M. Yushkevich, V. S. Kaavit, A. V. Mukha // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2025. – № 3 (88). – P. 5–16.