

Технологическое обеспечение качества расточных поверхностей изделий из алюминиевого сплава АМц на основе высокочастотного волнового воздействия

УДК 621.923



В. В. Максаров,
декан механико-машиностроительного факультета,
профессор,
докт. техн. наук,
эл. почта: maks78.54@mail.ru



А. О. Минин,
аспирант кафедры машиностроения,
эл. почта: minin.97alex@mail.ru



В. П. Захарова,
доцент кафедры машиностроения,
канд. техн. наук,
эл. почта: veraz73@mail.ru

Санкт-Петербургский горный университет,
Санкт-Петербург, Россия

Введение

Среди цветных металлов наиболее широко применяемыми являются сплавы с алюминием. Данный фактор обусловлен их уникальными физико-механическими свойствами, отличающими их от других материалов. Алюминий и его сплавы превосходят низкоуглеродистые и углеродистые стали по показателям коррозионной стойкости и удельной прочности. Также по сравнению с высокопрочными сталями отличительными свойствами алюминиевых сплавов являются высокие показатели тепло- (226 Вт/(м·К)) и электропроводности, пластичности при высокой удельной прочности [1–3].

Алюминий получил широкое распространение в машиностроении, нефтегазовом и энергетическом секторах, автомобиле- и судостроении и др. Например, одним из факторов, определяющим высокий процент применения алюминия и его сплавов в авиа- и машиностроении, является коррозионная стойкость и высокие показатели удельной прочности, что позволяет в значительной мере снизить массу изделия. Это способствует снижению объемов выбросов CO₂ в результате уменьшения объема расходуемого топлива [4, 5]. Также для алюминиевых сплавов в отличие от сталей характерно повышение пластичности и прочности при

Рассмотрена проблема образования нароста при растачивании отверстий в изделиях из алюминиевого сплава АМц, приводящего к увеличению шероховатости обработанной поверхности. Проведен анализ факторов, влияющих на процесс наростообразования при обработке данного сплава. Предложен способ растачивания отверстий в изделиях из коррозионностойких алюминиевых сплавов на основе высокочастотного волнового воздействия. В рамках исследования проведен анализ влияния процесса затухания звуковых волн на продуктивность применения способа. Выполнено моделирование процесса распространения звуковой волны от магнитострикционного преобразователя до зоны резания при растачивании внутренней поверхности изделия из алюминиевого сплава АМц с применением концентраторов различных форм. Проведено исследование с применением экспериментального моделирования процесса распространения звуковой волны от магнитострикционного преобразователя до зоны резания при растачивании внутренней поверхности изделия из алюминиевого сплава АМц в случае осуществления способа, взятого за прототип. Выполненное моделирование распространения звуковых волн позволяет оценить процент затухания в процессе их распространения. Модель показала, что наибольший эффект волнового воздействия зафиксирован при растачивании отверстий в изделиях из коррозионностойких алюминиевых сплавов с применением концентратора конической формы.

Ключевые слова: алюминиевый сплав АМц, шероховатость поверхности, наростообразование, режимы резания, высокочастотное волновое воздействие, сливная стружка, звуковая волна, процесс затухания.

DOI: 10.17580/tsm.2023.04.12

снижении температуры до –273 °С, что также имеет большое значение в авиастроении.

На энергетический сектор приходится 10 % общего потребления алюминия. В частности, алюминиевые сплавы применяют для изготовления крупногабаритных изделий, например корпусов элегазовых трансформаторов. Их изготавливают из сплава АМц, обладающего высокими показателями коррозионной стойкости и пластичности. При изготовлении таких корпусов необходимо обеспечить высокие показатели качества внутренних поверхностей, так как в них под давлением закачивают элегаз, а при наличии высокого уровня неровностей на внутренней поверхности корпуса в элегазовом трансформаторе происходит формирование электрической дуги, увеличивающей давление в корпусе, что может привести к разрыву емкости и, как следствие, выходу из строя трансформатора [5, 6].

Образование нароста является негативным фактором при необходимости обеспечения высоких показателей качества в процессе обработки внутренних поверхностей изделий из алюминиевого сплава АМц. При выполнении операций растачивания отверстий происходит формирование сливной стружки, что является показателем правильно подобранных режимных параметров. При сходе стружки такого типа по передней поверхности возникают силы трения, которые замедляют ее движение, вследствие чего увеличивается деформация в слоях металла, находящихся ближе к передней поверхности. В результате происходит процесс образования нароста в процессе отделения слоев металла от верхних слоев сходящей стружки, которые привариваются к передней поверхности [5, 6].

Образование нароста оказывает влияние на износ режущего инструмента, процесс механической обработки и качество обработанной поверхности. Известно, что в случае образования нароста изменяется геометрия режущей части резца в результате увеличения угла γ до фактического значения угла γ_n , образуемого наростом. В соответствии с этим происходит и уменьшение угла резания δ до величины δ_n , что облегчает сход стружки [7].

На основании сказанного можно сделать вывод, что изменение углов режущей части резца в результате образования нароста в процессе растачивания отверстий приводит к изменению формы получаемых отверстий, ухудшению шероховатости обработанных поверхностей и повышению уровня вибраций [7, 8].

С течением времени размер нароста увеличивается в результате наращивания новых слоев металла (рис. 1, а), изменяя при этом координаты вершины резца. Также при этом происходит формирование части нароста, нависающей над задней поверхностью резца (см. рис. 1, б) [9, 10]. Данный эффект приводит к изменению заднего угла резца, что вызывает отклонение размеров получаемых отверстий и увеличение шероховатости обрабатываемых поверхностей. В определенный момент эта часть нароста отделяется от основной массы металла и, попадая между задней поверхностью резца и обработанной поверхностью (см. рис. 1, в), вдавливается в уже обработанную поверхность (см. рис. 1, г), что приводит к увеличению шероховатости поверхности и образованию на ней надиров и вырывов [11–13].

Частицы нароста, оставшиеся на передней поверхности резца, также срываются и удаляются со стружкой (см. рис. 1, д). В процессе обработки происходит около 70–80 срывов в секунду, что объясняется

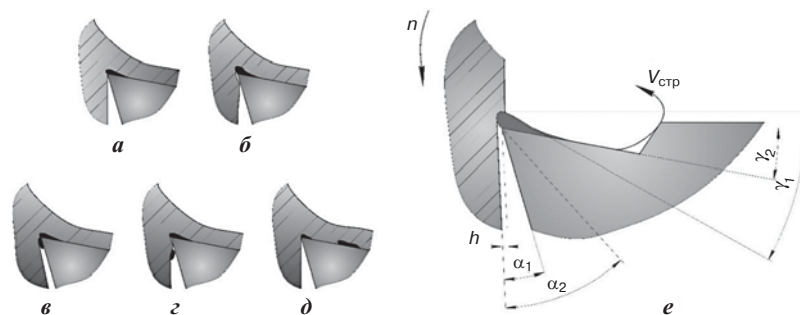


Рис. 1. Модель процесса образования нароста и его срыва:
 n — направление вращения заготовки; $V_{стр}$ — направление схода стружки;
 γ — передний угол; α — задний угол

вибрациями, возникающими в процессе резания при наростообразовании. При формировании налипания по обработанной поверхности заготовки и образовании нароста происходит изменение толщины срезаемого слоя, что приводит к отклонению размеров обработанной поверхности на величину h (см. рис. 1, е). Если в координате режущей кромки инструментальные геометрические параметры переднего γ_1 и заднего α_1 углов являются постоянными, то изменяющаяся координата вершины в процессе обработки из-за увеличения нароста и его срыва приводит к непостоянному значению геометрических параметров переднего γ_2 и заднего α_2 углов [14, 15].

Материал и методика проведения исследований

В общих случаях существует несколько способов воздействия на процесс образования нароста:

- режимные параметры резания (V, S, t);
- параметры режущего инструмента (углы резца);
- пластичность обрабатываемого материала.

В частном случае изменение режимов резания позволяет уменьшить периодичность наростообразования. Например, при снижении подачи резания до 0,1–0,2 мм/об. при обработке на скоростях резания менее 10 м/мин или более 60 м/мин можно достичь понижения процента и периодичности образования нароста. Однако при использовании алюминиевого сплава АМц такой эффект недостижим в силу его высокой пластичности. На процесс образования нароста могут повлиять и углы резания: передний угол γ , главный угол в плане ϕ и угол наклона главной режущей кромки λ [16, 17].

При обработке конструкционных сталей с увеличением значения угла γ наблюдается снижение вероятности наростообразования, облегчается сход стружки и уменьшается деформация срезаемого слоя. С уменьшением величины угла ϕ снижается шероховатость обработанной поверхности, увеличивается активная рабочая длина главной режущей кромки, но при этом повышается вероятность возникновения вибраций, снижающих качество обработанной поверхности. Изменение угла λ влияет на направление вектора схода

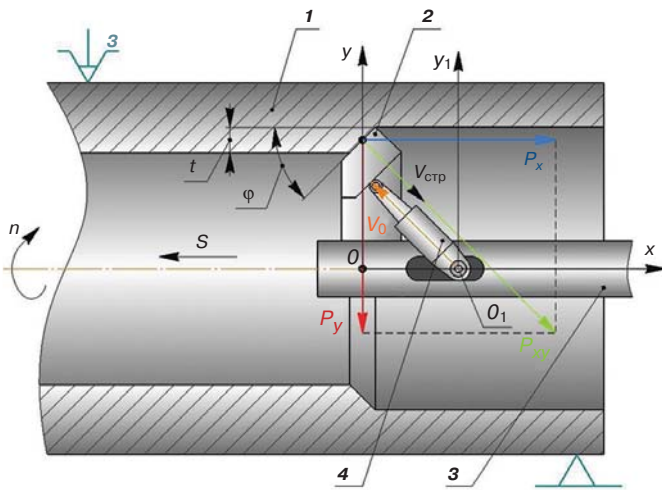


Рис. 2. Модель высокочастотного волнового воздействия на инструментальную систему на расточных операциях изделия: 1 — заготовка; 2 — резец; 3 — расточная оправка; 4 — устройство высокочастотного воздействия, в состав которого входят магнитострикционный преобразователь, концентратор и излучатель высокочастотного воздействия; S — направление подачи резания; t — глубина резания; n — частота вращения заготовки; $V_{стр}$ — вектор направления схода стружки; V_0 — вектор направления высокочастотного волнового воздействия; P_{xy} — равнодействующая сила резания

стружки. При чистовом точении положительное значение угла λ может привести к ухудшению качества обработанной поверхности [16, 17].

В настоящее время разрабатывается множество различных технических решений для улучшения шероховатости изделий и улучшения технологичности узлов агрегатов [18]. Одним из методов снижения вероятности образования нароста является способ растачивания отверстий на основе высокочастотного волнового воздействия. Передача волновой энергии в зону резания позволяет управлять процессом наростообразования с целью снижения вероятности его образования без изменения режимных параметров обработки и параметров режущего инструмента [19–21].

Изучению влияния процесса высокочастотной обработки на качество изделий из алюминия и его сплавов посвящены работы многих ученых. Так, в работах Ю. В. Холопова рассмотрено влияние воздействия волновой энергии на заготовку в радиальном направлении [22, 23]. В этом случае устройство подводится к заготовке и выступает в роли выглаживающего элемента (индентора) с шариком или роликом на конце. В результате применения такого способа происходит стандартная токарная обработка с параллельным высокочастотным выглаживанием, что приводит к уменьшению шероховатости вследствие сглаживания неровностей. Однако выбранное направление приложения волнового воздействия может послужить причиной повышенного износа узлов технологической системы и наложения высокочастотных колебаний на автоколебания технологической системы [24, 25].

В Санкт-Петербургском горном университете разработан способ растачивания отверстий в изделиях из коррозионностойких алюминиевых сплавов, заключающийся в формировании в процессе технологической обработки энергии бегущих волн от точки контакта излучателя с резцом в направлении зоны резания, противоположной направлению вектора схода стружки (рис. 2). Такое воздействие позволяет снизить вероятность наростообразования при сходе стружки по передней поверхности резца [26].

Данную технологию реализуют следующим образом: заготовку 1 помещают в трехулачковый патрон; в резцедержатель устанавливают стержень расточной оправки 3, на котором закрепляют расточный резец 2 в зависимости от направления вращения заготовки; при помощи осевого элемента расточной оправки закрепляется магнитострикционный преобразователь 4 [26].

Отличительной характеристикой разработанной методики растачивания отверстий в изделиях из коррозионностойких алюминиевых сплавов является способ закрепления устройства, при котором высокочастотное воздействие выполняется в направлении, противоположном направлению вектора схода стружки, и при этом обеспечивается плотный контакт излучателя с приливом на передней поверхности резания [26].

Одной из основных характеристик протекания волнового воздействия является затухание механических колебаний [27, 28]. Это явление снижения интенсивности звуковой волны происходит по таким причинам, как рассеяние механических колебаний, переход волны от источника в другую среду, увеличивающееся расстояние от источника [29].

При использовании способа высокочастотного волнового воздействия необходимо осуществлять подбор формы концентратора, так как его конструктивные параметры оказывают влияние на уровень затухания звуковых волн. В данном случае выделяют четыре основные формы концентраторов: конические, экспоненциальные, ступенчатые с фланцем и без него [30–32].

Анализ вопроса цифровой интеграции стал предпосылкой для разработки модели технологической системы, позволяющей определить влияние различных факторов на процесс растачивания отверстий [33]. В рамках исследования проводили имитационное моделирование процесса распространения высокочастотного волнового воздействия в процессе применения способа растачивания отверстий в изделиях из коррозионностойких алюминиевых сплавов, с применением концентраторов звуковых волн, обозначенных ранее форм. Исследование проводили в программной среде Comsol в двумерной системе с заданными физико-механическими свойствами материалов и геометрическими параметрами [34, 35].

Проводили пять групп исследований с применением волнового воздействия с частотой $f = 20$ кГц

и амплитудой колебаний $A = 1$ мкм. Значение амплитуды колебаний получено в программной среде Comsol после ввода исходных данных. Момент времени фиксирования результата t_d находится в диапазоне $[0; 15 \cdot 10^{-4}]$ с. За эталонное значение скорости волны принято максимально достигнутое значение в концентраторах, равное 1 м/с. Фиксирование результатов выполняли с шагом $25 \cdot 10^{-7}$ с.

Экспериментальное исследование проводили при следующих режимных параметрах: скорость резания $V = 215$ м/мин; подача резания $S = 0,05$ мм/об.; глубина резания за один проход $t = 0,2$ мм; частота вращения заготовки $n = 227$ мин⁻¹. В качестве инструментального материала выбран твердый сплав ВК3. Приняты следующие геометрические параметры режущего инструмента: радиус при вершине резца $r = 0,7$ мм; главный угол в плане $\varphi = 45^\circ$; вспомогательный угол в плане $\varphi_1 = 45^\circ$; угол наклона режущей кромки $\lambda = 0^\circ$; главный передний угол $\gamma = 10^\circ$; задний угол $\alpha = 12^\circ$. Диаметр обрабатываемого отверстия $d = 300$ мм, диаметр обработанного отверстия $D = 304$ мм. Эксперимент проводили без применения смазочно-охлаждающей жидкости. В рамках исследования после растачивания отверстия необходимо получить поверхность с параметром шероховатости $Ra < 1,2$ мкм.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате проведения экспериментальных исследований максимальное значение скорости волны в зоне резания достигнуто при использовании концентратора конической формы на $1,7 \cdot 10^{-4}$ с, при этом значение скорости находилось в диапазоне 0,5–0,6 м/с, а затухание волнового воздействия составляло около 55 % (рис. 3, а). В случае применения других форм концентратора затухание волнового воздействия в зоне резания составляло от 70 до 85 %.

Для оценки эффективности предложенного процесса волнового воздействия на процесс резания провели моделирование существующего способа обработки, при котором волновое воздействие осуществляется в направлении подачи резания, а концентратор поджат к боковой поверхности резца. В результате исследования получены данные о максимальной скорости волны в зоне резания, которые находились в диапазоне 0,11–0,15 м/с, на $1,225 \cdot 10^{-4}$ с, что составляет ~90 % затухания звуковой волны (см. рис. 3, б).

Максимальное затухание при использовании концентраторов ступенчатой формы можно объяснить рассеянием колебаний из-за неоднородности формы, в результате чего происходит уменьшение амплитуды вследствие отражения от стенок концентратора.

При исследовании распространения звуковых волн в направлении подачи резания зафиксирован максимальный процент затухания механических колебаний, равный ~88 %. Данный эффект объясняется направлением воздействия, при котором происходит

преломление траектории распространения волны и ее рассеивание при отражении от стенок резца до достижения зоны резания.

В результате экспериментальных исследований получены профилограммы обработанных поверхностей при растачивании отверстий изделий из коррозионно-стойких алюминиевых сплавов для двух способов высокочастотного волнового воздействия. При применении волнового воздействия в направлении подачи резания с режимами резания (скорость резания $V = 215$ м/мин; подача резания $S = 0,05$ мм/об.; глубина резания за один проход $t = 0,2$ мм; частота вращения заготовки $n = 227$ мин⁻¹ (рис. 4, а)), шероховатость поверхности составляет $Ra = 1,537$ мкм, средний шаг неровностей профиля $Sm = 0,2$ мм, высота неровностей профиля $Rz = 7,610$ мкм, что обусловлено снижением виброустойчивости технологической системы и износостойкости режущего инструмента.

При применении разработанного способа воздействия в направлении, противоположном сходу стружки, с режимами резания (скорость резания $V = 215$ м/мин; подача резания $S = 0,05$ мм/об.; глубина резания за один проход $t = 0,2$ мм; частота вращения заготовки $n = 227$ мин⁻¹) наблюдается улучшение шероховатости обработанных поверхностей отверстий до значения $Ra = 1,069$ мкм (см. рис. 4, б).

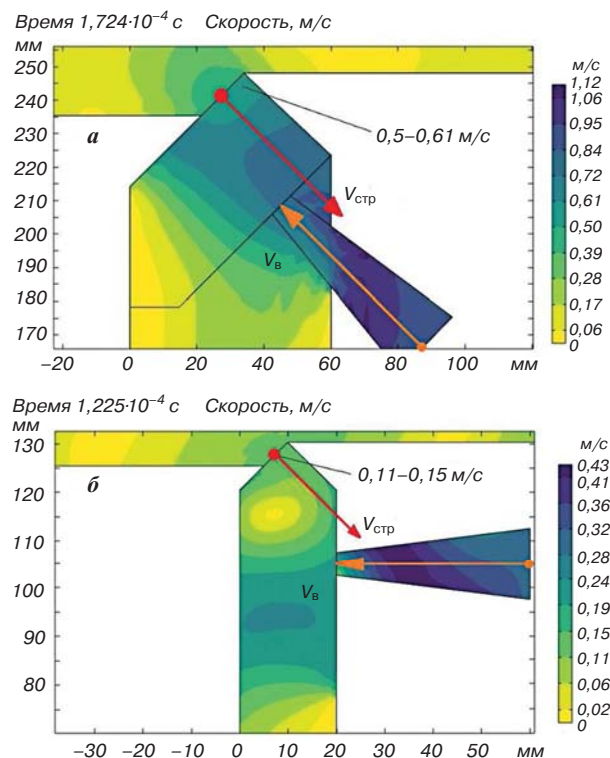


Рис. 3. Модель распространения звуковых волн при растачивании отверстий в изделиях из коррозионно-стойких алюминиевых сплавов при применении концентратора конической формы в направлении, противоположном сходу стружки (а) и в направлении подачи резания (б): $V_{стр}$ — вектор направления схода стружки; V_w — вектор направления волнового воздействия

Заключение

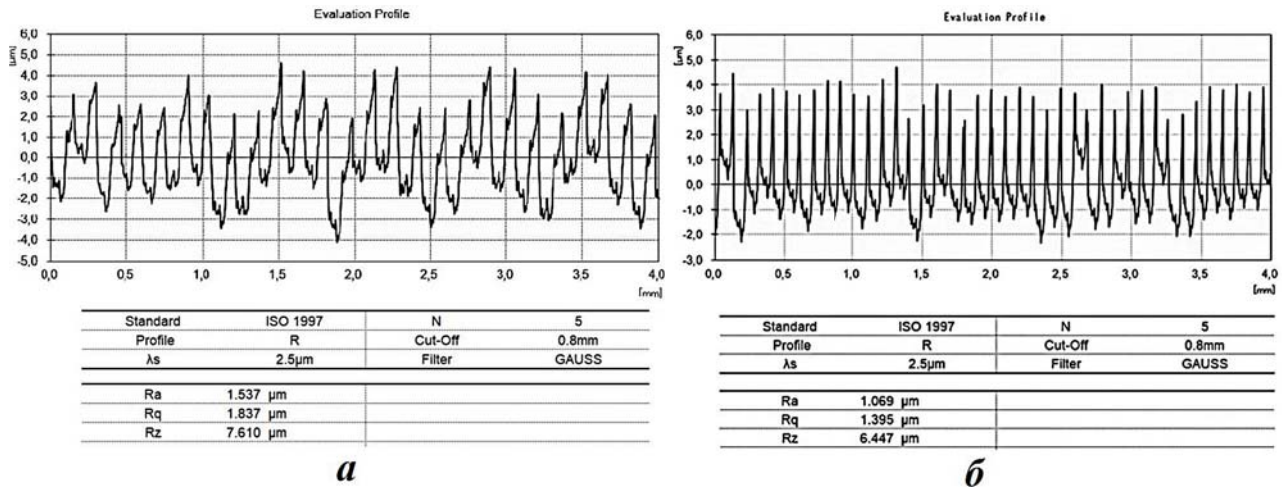


Рис. 4. Профилограммы обработанных поверхностей при высокочастотном волновом воздействии в направлении подачи резания (а) и в направлении, противоположном сходу стружки (б) (вид с экрана монитора)

В ходе проведенных исследований и моделирования способов высокочастотного волнового воздействия на процесс резания при растачивании отверстий в изделиях из коррозионностойких алюминиевых сплавов установлено, что энергия бегущих волн по стержню державки расточного резца не позволяет сформироваться наросту при сходе стружки по передней поверхности резца и устраняет налипание слоев нароста на обрабатываемую поверхность, что оказывает влияние на качество обрабатываемой поверхности и существенно улучшает шероховатость поверхности коррозионностойких алюминиевых сплавов.

Математическое моделирование процесса распространения высокочастотного волнового воздействия в зону резания от резонансного волновода до державки резца позволило установить наиболее эффективный вектор направления воздействия. Исследования показали, что при волновом воздействии в направлении, противоположном вектору схода стружки, макси-

мальное значение скорости (0,5–0,6 м/с) волны в зоне резания достигается при использовании концентратора конической формы на $1,7 \cdot 10^{-4}$ с, а затухание волнового воздействия составляет ~55 %, в то время как при волновом воздействии в направлении подачи резания при максимальной скорости волны в диапазоне 0,11–0,15 м/с на $1,225 \cdot 10^{-4}$ с затухание волнового воздействия составляет около 90 %.

Установлено, что для достижения требуемых параметров шероховатости поверхности при растачивании отверстий в изделиях из коррозионностойких алюминиевых сплавов марки АМц необходимо использование способа высокочастотного волнового воздействия в направлении, противоположном направлению подачи, что позволяет обеспечить шероховатость до значений $Ra = 1,069$ мкм без применения дополнительной финишной обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

См. англ. блок



*Tsvetnye Metally. 2023. No. 4. pp. 90–95
DOI: 10.17580/tsm.2023.04.12*

ENSURING SURFACE QUALITY IN ALMN ALLOY ITEMS DURING HIGH-FREQUENCY WAVE IMPACT BORING

Information about authors

V. V. Maksarov, Dean of the Mechanical Engineering Faculty¹, Professor, Doctor of Technical Sciences, e-mail: maks78.54@mail.ru
A. O. Minin, Postgraduate Student at the Mechanical Engineering Department¹, e-mail: minin.97alex@mail.ru
V. P. Zakharova, Associate Professor at the Mechanical Engineering Department¹, Candidate of Technical Sciences, e-mail: veraz73@mail.ru

¹Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.

Abstract

This paper examines the problem of build-up formation when making bore holes in items made of aluminium alloy AlMn, which can lead to increased roughness of the machined surface. The authors analyzed factors influencing the build-up formation when machining the said alloy.

It is proposed to use high-frequency wave impacts for making bore holes in items made of corrosion-resistant aluminium alloys. The authors also analyzed how attenuation of sound waves may affect the productivity of this technique. The authors built a model showing how the sound wave is propagating from the magnetostrictor to the cutting zone when making bore holes in the internal surface of an AlMn alloy item using concentrators of different shapes. A study was carried out that involved simulation of the sound wave propagation from the magnetostrictor to the cutting zone when making bore holes in the internal surface of an AlMn alloy item when employing the technique taken for prototype.

The sound wave propagation model helps estimate the attenuation degree of the waves as they propagate. According to the model, the wave impact registered was at its highest when a tapered concentrator was used for making bore holes in items made of corrosion-resistant aluminium alloys.

Key words: aluminium alloy AlMn, surface roughness, build-up formation, cutting modes, high-frequency wave impact, flow chip, sound wave, attenuation.

References

1. Belyaev A. I., Bochvar O. S., Buynov N. N. et al. Metallurgy of aluminium and its alloys: Reference book. 2nd revised edition. Moscow : Metallurgiya, 1983. 280 p.



2. Savchenkov S. A., Kosov Y. I., Bazhin V. Y., Krylov K. A., Kawalla R. Microstructural master alloys features of aluminum – erbium system. *Crystals*. 2021. Vol. 11, Iss. 11. 1353. DOI: 10.3390/cryst11111353.
3. Schmitz Ch. Handbook of aluminum recycling. VulkanVerlag, 2006. 454 p.
4. Alattar A. L., Bazhin V. Y. Al – Cu – B₄C composite materials for the production of high-strength billets. *Metallurgist*. 2020. Vol. 64. pp. 566–573.
5. Bezyazychnyi V. F., Szczerek M., Pervov M. L., Timofeev M. V., Prokofiev M. A. The study of the effect of temperature on the ability of metals to accumulate energy during their plastic deformation. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 235. pp. 55–59. DOI: 10.31897/pmi.2019.1.55.
6. Kablov E. N. Aluminium alloys in aerospace engineering. Ed. by E. N. Kablov. Moscow : Nauka, 2001. 192 p.
7. Khalimonenka A. D., Timofeev D. Y., Golikov T. S. Cutting tool for turning large workpieces. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1399, Iss. 4. 044082.
8. Vasiliev A. S., Goncharov A. A. Special strategy of treatment of difficulty-profile conical screw surfaces of single-screw compressors working bodies. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 235. pp. 60–64. DOI: 10.31897/pmi.2019.1.60.
9. Bobrov V. F. Fundamentals of metal cutting theory. Moscow : Mashinostroenie, 1975. 340 p.
10. Vorontsova L. A., Maslov V. V., Peshkov I. B. Aluminium and aluminium alloys in industrial electrical equipment. Moscow : Energiya, 1971. 224 p.
11. Keksin A. I., Brigadnov I. A., Golikov T. S., Maksimov D. D. Ensuring quality when machining corrosion resistant aluminium alloys for obtaining ball-shaped parts. *Metallorabotka*. 2021. No. 1. pp. 33–43.
12. Granovskiy G. I., Granovskiy V. G. Cutting of metals: Textbook for universities specializing in mechanical and instrument engineering. Moscow : Vysshaya, 1985. 304 p.
13. Poduraev V. N. Vibration machining. Moscow : Mashinostroenie, 1970. 352 p.
14. Ershov D. Y., Lukyanenko N., Zlotnikov E. G. Dynamic properties of technological drive operating in acceleration mode. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2022. Vol. 232. pp. 323–333.
15. Mavliutov A. R., Zlotnikov E. G. Optimization of cutting parameters for machining time in turning process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 327, Iss. 4. 042069.
16. Anuriev V. I. Mechanical designer's handbook: In 3 volumes. Vol. 3. Ed. by I. N. Zhestkov. Moscow : Mashinostroenie, 2006. 928 p.
17. Maslov A. R., Skhirtladze A. G. Edge cutting machining of tough materials: Learner's guide. Moscow : Innovatsionnoe mashinostroenie, 2017. 208 p.
18. Teplyakova A. V., Azimov A. M., Alieva L. A., Zhukov I. A. Solutions to enhance durability and machinability of impact components of drills: Review and analysis. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2022. No. 9. pp. 120–132.
19. Bayat M., Amini S., Hadidi M. Effect of ultrasonic-assisted turning on geometrical tolerances in Al 2024-T6. *Materials and Manufacturing Processes*. 2021. Vol. 36, Iss. 16. pp. 1875–1886.
20. Khajehzadeh M., Boostanipour O., Amiri S. The influence of ultrasonic elliptical vibration amplitude on cutting tool flank wear. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2020. Vol. 234, Iss. 12. pp. 1499–1512.
21. He Y., Zhou Z., Zou P., Gao X., Ehmman K. F. Study of ultrasonic vibration-assisted thread turning of Inconel 718 superalloy. *Advances in Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 11, Iss. 10. pp. 1–12.
22. Kholopov Yu. V. Apparatus for abrasive-free ultrasonic finishing and final turning of complex-profile surfaces. Patent RF, No. 2317187. Applied: 10.01.2006. Published: 20.02.2008.
23. Kholopov Yu. V. Device for lathe work and finish machining of internal surfaces of details using ultrasound (versions). Patent RF, No. 2343064. Applied: 26.03.2007. Published: 10.01.2009.
24. Chu N. H., Nguyen V. Du, Ngo Q. H. Machinability enhancements of ultrasonic-assisted deep drilling of aluminum alloys. *Machining Science and Technology*. 2020. Vol. 24, Iss. 1. pp. 112–135. DOI: 10.1080/10910344.2019.1636267.
25. Ershov D. Y., Lukyanenko I. N. Vibration amplitude and frequency parameters of technological equipment drives. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2020. Vol. 187. pp. 537–548.
26. Maksarov V. V., Efimov A. E., Minin A. O. Method for boring holes in products from corrosion-resistant aluminum alloys. Patent RF, No. 2787289. Applied: 10.03.2020. Published: 02.09.2020.
27. Mayer V. V., Varaksina E. I. Sound and ultrasound in student research studies. Dolgoprudny : Izdatelskiy dom "Intellekt", 2012. 336 p.
28. Amini S., Bagheri A., Teimouri R. Ultrasonic-assisted ball burnishing of aluminum 6061 and AISI 1045 steel. *Materials and Manufacturing Processes*. 2018. Vol. 33, Iss. 11. pp. 1250–1259. DOI: 10.1080/10426914.2017.1364862.
29. Hara K., Fukuda T., Taguchi K., Isobe H. Surface texturing technique based on ultrasonic turning for improving tribological properties. *International Journal of Automation Technology*. 2022. Vol. 16, Iss. 1. pp. 78–86.
30. Potapov A. I., Kondratev A. V. Non-destructive testing of multilayer medium by the method of velocity of elastic waves hodograph. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 243. pp. 348–356. DOI: 10.31897/pmi.2020.3.348.
31. Babitsky V. I., Mitrofanov A. V., Silberschmidt V. V. Ultrasonically assisted turning of aviation materials: Simulations and experimental study. *Ultrasonics*. 2004. Vol. 42, Iss. 1–9. pp. 81–86. DOI: 10.1016/j.ultras.2004.02.001.
32. Zharkov I. G. Vibration during edge cutting machining. Leningrad : Mashinostroenie, 1986. 184 p.
33. Litvinenko V. S. Digital economy as a factor in the technological development of the mineral sector. *Natural Resources Research*. 2020. Vol. 29, Iss. 1. pp. 1521–1541. DOI: 10.1007/s11053-019-09568-4.
34. Pompeev K. P., Timofeev D. Y. Precision dimensional analysis in CAD design of reliable technologies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental*. 2018. Vol. 194, Iss. 2. 022028. DOI: 10.1088/1755-1315/194/2/022028.
35. Lyubomudrov S. A., Khrustaleva I. N., Tolstoles A. A., Maslakov A. P. Improving the efficiency of technological preparation of single and small batch production based on simulation modeling. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 240. pp. 669–677. DOI: 10.31897/pmi.2019.6.669.

