

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 6 (168). С. 19-30.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 6 (168). P. 19-30.

Научная статья
УДК 536:621.9
doi: 10.30987/2223-4608-2025-6-19-30

Исследование возможностей повышения комплекса эксплуатационных свойств волновым деформационным упрочнением

Евгений Степанович Киселев, д.т.н.
Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия
kesc.ulstu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1745-9016>

Аннотация. Использование ультразвуковых размерных технологий для уменьшения технологических остаточных напряжений, возникающих в процессе механической обработки заготовок нежестких деталей из сплавов с низкой температурой плавления, является одним из наиболее эффективных методов изготовления конструктивно сложных деталей. Рассмотрены основные методы использования модулированных ультразвуковых колебаний (УЗК) и их преимущества при введении в зону обработки на операциях фрезерования. Особое внимание уделено применению различных видов модуляции УЗК для увеличения эффективности снижения технологических остаточных напряжений путем вовлечения в процесс релаксации перемещений дислокационных отрезков разной длины при обработке тонкостенных нежестких заготовок из алюминиевых сплавов. Технологические остаточные напряжения оценивались с использованием измерительно-вычислительного комплекса «Ситон-АРМ». Фазовые изменения в поверхностном слое алюминиевых деталей – рентгеновского измерительного комплекса «Рикор-7». Полученные данные обрабатывали на ЭВМ с использованием программы MD-10. Модуляцию УЗК осуществляли с использованием оригинальной установки, включающей в себя УЗ генератор, ПЭВМ, генерирующую сигнал модуляции на два канала: на первом формируется – синусоидальный, на втором – синусоидальный, квадратный или треугольный со смещением по фазе на 0, либо на 90°. Установлено, что наиболее эффективным методом является наложение модулированных УЗК, при котором сигнал первого источника имеет синусоидальную, а сигнал второго - квадратную форму и смещён по фазе на 90°. Исследования с измерением положений обработанных поверхностей тонкостенных деталей с использованием контактного датчика Renishaw OMP40 показали, что при этом их коробление уменьшается на 30...40%. Существенной разницы в результатах обработки заготовок из деформируемых алюминиевых сплавов Д16 и АК6 не зафиксировано.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, технологические остаточные напряжения, фазовый состав, ультразвук, модуляция, заготовка, нежесткая деталь, фрезерование

Благодарности: исследование выполнено с использованием финансовых средств гранта Российского научного фонда № 24-29-00206, <https://rscf.ru/project/24-29-00206/>

Для цитирования: Киселев Е.С. Повышение эффективности изготовления нежестких деталей введением в зону формообразования энергии модулированных ультразвуковых колебаний // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 6 (168). С. 19–30. doi: 10.30987/2223-4608-2025-6-19-30

Improving the manufacturing efficiency of non-rigid parts by introducing the energy of modulated ultrasonic vibrations into the shaping zone

Evgeny S. Kiselyov, D. Eng.
Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia
kesc.ulstu@mail.ru

Abstract. *The use of ultrasonic dimensional technologies to reduce technological residual stresses occurring under machining of non-rigid blanks in parts made of alloys with a low melting point is one of the most effective methods for manufacturing structurally complex parts. The main methods of using modulated ultrasonic vibrations (UsV) and their advantages when introduced into the machining zone during milling operations are viewed. Special attention is paid to the use of various types of UsV modulation to increase the efficiency of reducing technological residual stresses by involving dislocation segments of different lengths in the relaxation process when machining thin-walled non-rigid aluminum alloy blanks. The technological residual stresses were evaluated using the Seton-ARM measuring and computing complex. Phase changes in the surface layer of aluminum parts of the Rikor-7 X-ray measuring complex. The data obtained was processed on a computer using the MD-10 program. The UsV modulation was carried out using an original installation that includes a ultrasonic generator, a PC that generates a modulation signal into two channels: on the first channel, a sinusoidal one, on the second, a sinusoidal, square or triangular one with a phase offset of 0 or 90 degrees. Studies measuring the positions of the treated surfaces of thin-walled parts using the Renishaw OMP40 contact sensor have shown that their twisted effect decreases by 30...40%. There was no significant difference in the results of processing workpieces made of deformable aluminum alloys D16 and AK6.*

Keywords: aluminum alloys, technological residual stresses, phase composition, ultrasound, modulation, blank, non-rigid part, milling

Acknowledgments: The study was carried out using financial resources from the Russian Science Foundation grant No. 24-29-00206, <https://rscf.ru/project/24-29-00206/>

For citation: Kiselyov E.S. Improving the manufacturing efficiency of non-rigid parts by introducing the energy of modulated ultrasonic vibrations into the shaping zone / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 6 (168). P. 19–30 doi: 10.30987/2223-4608-2025-6-19-30

Введение

В металлообрабатывающем машиностроении все чаще сталкиваются с проблемами, возникающими в процессе изготовления увеличивающегося количества сложных и нежестких, тонкостенных деталей. Такие детали изготавливаемые, в основном, из алюминиевых, титановых и жаропрочных сплавов, а также высоколегированных сталей, широко используются в летательных аппаратах, в авиационном моторостроении, наземном и водном транспорте. После механической обработки и снятия со станка или по истечению непродолжительного времени они чаще других подвержены опасности коробления из-за интенсивного перераспределения технологических остаточных напряжений (ТОН). Последнее объясняется тем, что детали, изготавливаемые из легкоплавких и обладающих высокой теплопроводностью алюминиевых сплавов, в процессе высокоскоростной обработки в зоне формообразования имеют контактные температуры, приближающиеся к температуре плавления (450...550 °С). Это приводит к

интенсивным фазовым превращениям, являющимися основными причинами возникновения ТОН.

При изготовлении деталей из высоколегированных сталей, титановых и жаропрочных сплавов, имеющих более высокую температуру плавления, но обладающих недостаточной теплопроводностью, вся теплота, образующаяся в зоне контакта инструмента с заготовкой, из-за повышенной теплосиловой напряженности процесса резания, интенсивно прогревает поверхностные слои (ПС) тонкостенных нежестких деталей, приводя к тем же результатам, что и при обработке алюминиевых заготовок.

Уменьшение теплообразований в зоне резания осуществляется на практике, главным образом, за счет рационального использования смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ), потенциальные возможности которых всесторонне изучены, в основном, сотрудниками научных школ М.И. Клушина [1] и Л.В. Худобина [2]. После публикаций во второй половине XX в. монографий Бергмана Л. [3], Курмаба Д. [4], Маркова А.И. [5], Подураева В.Н.

[6] и др., возник интерес к другому методу снижения теплосилового напряжения – к введению в зону формообразования деталей при механической обработке энергии ультразвукового (УЗ) поля. Однако возможности реализации УЗ размерной механической обработки в действующем производстве ограничивались необходимостью создания специальных приспособлений для наложения ультразвуковых колебаний (УЗК) на заготовку (инструмент, СОЖ, детали станка и технологической оснастки и др.) [2 – 7]. В начале XXI в. компанией DMG MORI была разработана и серийно выпущена серия станков ULTRASONIC, в конструкцию шпиндельного узла которых было встроено устройство возбуждения УЗ колебаний (УЗК) [8]. В этих станках синусоидальные УЗ-колебания накладываются на инструмент вдоль его продольной оси, что позволяет до 30...40 % уменьшать силы резания, а следовательно, и контактные температуры в зоне резания. Такие станки находят широкое применение на аэрокосмических предприятиях промышленно развитых стран. Одновременно, серийно выпускаются и станки AXILE Machining, а также УЗ оправки (компания Altrasonic, CRENOIndustry, Pulchertool и др.), использование которых наблюдается на обрабатываемых центрах с ЧПУ [9].

Из основных эффектов использования энергии УЗ поля при механической обработке наиболее значимыми являются: эффект снижения трения и увеличение пластичности контуров как при параллельном, так и при нормальном направлении колебательных смещений относительно граничных поверхностей; возникновение в СОЖ массы пульсирующих пузырьков, заполненных паром, газом или их смесью (кавитация); УЗ релаксация ТОН в поверхностном слое (ПС) обработанных заготовок.

Методы исследований и материалы

Эффективность использования при механической обработке традиционных синусоидальных УЗ колебаний изучена достаточно

глубоко [3 – 7]. Однако, характер распределения температурных полей в тонкостенных нежестких деталях существенным образом отличается от остальных. При их изготовлении, из-за относительно малых расстояний между границами стенок, заготовки достаточно быстро прогреваются до высоких температур, что неизбежно приводят к деформациям готовой детали, причинами которых могут быть ТОН. Поэтому было крайне необходимо найти новые методы, позволяющие повысить эффективность использования энергии УЗ поля при механической обработке на основе дополнительного изучения механизмов воздействия УЗК на процессы транспортирования СОЖ, фазовых изменений в ПС и формирования ТОН. Такие методы были найдены сотрудниками научной школы Ульяновского государственного технического университета после анализа и изучения перспективных путей интенсификации УЗ размерной обработки. Одним из них является модуляция УЗ сигнала. Модулированные колебания – это колебания с относительно медленным изменением амплитуды, частоты, формы или фазы таким образом, чтобы за период колебаний модулированный параметр изменялся со скоростью, существенно меньшей по сравнению с УЗК.

В настоящее время апробированы два основных направления использования модулированных УЗК для интенсификации процессов механической обработки:

- 1) возбуждение кавитации в среде СОЖ с целью вовлечения в её процессы разных по размерам паровоздушных пузырьков жидкости и пара;
- 2) воздействие на дислокации разных размеров ПС обрабатываемых заготовок для их движения в равновесное состояние.

На практике модуляцию можно реализовать, накладывая на УЗ волновод (насадок для подачи СОЖ, инструмент, заготовку или элемент приспособления) дополнительные модулированные по амплитуде, частоте, форме или фазе колебания. Как правило, модуляция УЗ сигнала осуществляется путем внесения

соответствующих изменений в схему УЗ генератора, генерирующего основные синусоидальные сигналы постоянной амплитуды и частоты [10], или с использованием оригинальной установки генерации УЗ волн, включающей в себя УЗ генератор (например, УЗГ 1002205), ПЭВМ, генерирующую сигнал модуляции на два канала, блок питания. В этом случае в качестве управляющего воздействия может быть выбрана программа Soundcard Score, использование которой позволяет реализовать на практике достаточно широкий спектр генерации сигналов разных частот и их продолжительности, а также форм сигнала. Имеется возможность выбора интенсивности звучания, что облегчает осуществление настройки отдельно правого и левого канала, а также фазы правого канала.

Принципиальная схема и общий вид УЗ установки представлены в работе [11]. Её отличие от ранее разработанной для модуляции по амплитуде и частоте [10], заключается в модуляции УЗК по форме сигнала и фазе от двух источников колебаний, а также в том, что заготовка является звеном колебательной системы. Размеры волновода и отражателя рассчитаны так, чтобы на ней возникал максимум амплитуды стоячей волны. УЗ система крепится к столу металлорежущего станка через универсальный динамометр УДМ-100, что позволяет в процессе обработки осуществлять измерения составляющих силы резания P_x , P_y , P_z .

Возбуждение модулированных УЗК в среде СОЖ с целью вовлечения в процессы кавитации разных по размерам паровоздушных пузырьков жидкости и пара для интенсификации её транспортирования в зоны формообразования деталей при шлифовании и глубоком сверлении достаточно подробно описано в работах [2, 7, 10]. Поэтому в данной работе более детально сосредоточимся на взаимодействии модулированных УЗК с дислокациями разных размеров поверхностного слоя металла обрабатываемых заготовок. Очевидно, для того чтобы обеспечить движение дислокаций в широком диапазоне размеров, необходимо расширять

как спектр частот, так и диапазон амплитуд применяемых УЗК. На практике это можно осуществить, накладывая на волновод модулированные по частоте, амплитуде, фазе колебания, по форме сигнала и др. [10].

При воздействии УЗК с частотой в киллогерцевом диапазоне их поглощение дислокациями ПС обусловлено амплитудно-зависимым гистерезисом [12]. При этом с ростом амплитуды колебаний растёт петля гистерезиса, декремент затухания экспоненциально увеличивается. При дальнейшем расширении петли, встретив препятствия, дислокации способны преодолевать их с помощью механизма двойного поперечного скольжения. Поскольку в результате акта двойного поперечного скольжения в соседней параллельной плоскости скольжения возникают новые дислокационные источники (источники Франка-Рида), это приводит к увеличению плотности дислокаций. Переход дислокаций в соседние плоскости скольжения и образование новых источников двойного поперечного скольжения осуществляется в том случае, если расстояние до этих плоскостей больше критического расстояния $h_{кр}$:

$$h_{кр} = \frac{M \cdot v}{8\pi(1 - \nu)(\sigma - \sigma_f)}, \quad (1)$$

где M – модуль сдвига; v – вектор Бюргерса; σ – напряжение течения; σ_f – атермическая компонента напряжений трения вследствие взаимодействия дислокаций с точечными препятствиями.

Исследованиями [12] установлено, что по сравнению с деформацией в обычных условиях (без УЗК) дислокации материала, находясь в УЗ поле с частотой порядка десятков киллогерц в 3 – 4 раза, чаще испытывают механизм двойного поперечного скольжения. При этом с увеличением амплитуды УЗК растёт площадь областей возможного старта дислокаций, что в свою очередь, увеличивает вероятность их выхода в поперечную плоскость скольжения с образованием источников Франка-Рида и их последующее размножение

методом двойного поперечного скольжения [12]. Длина свободного пробега дислокаций может изменяться в различных пределах от 10^{-5} до 10^{-3} м и ограничена размерами зерна кристалла и продолжительностью воздействия источника переменного напряженного поля того или иного знака, то есть частотой УЗК. При небольших размерах зерна и достаточно невысокой частоте приложенных УЗК в течение первой полуволны дислокация успевает достичь границ зерен. В более крупном зерне дислокация не успевает достичь границ зерен, и в течение отрицательного периода полу волны будет тормозиться из-за трения, обусловленного наличием точечных дефектов кристаллической решетки. Возрастание атермической компоненты напряжений трения приводит к увеличению значения критического расстояния $h_{кр}$.

Очевидно, что вероятность образования источника Франка-Рида в соседней плоскости уменьшается. Варьирование частотой и амплитудой УЗК в зависимости от микроструктуры обрабатываемого материала открывает возможность определенным образом воздействовать на процесс образования дислокаций и

упрочнения в целом. При этом эффективность того или иного вида модуляции УЗ воздействия (по амплитуде или частоте) существенно зависит как от соотношения режимов обработки и параметров УЗК, так и от микроструктуры обрабатываемого материала.

При модуляции амплитуды синусоидальным сигналом уравнение, описывающее такое колебание, имеет вид:

$$A = A_0(1 + m_a \sin \Omega \tau) \cdot \sin(\omega \tau + \varphi_0), \quad (2)$$

где A_0 – амплитуда исходного колебания параметра, м; $\omega = 2\pi f$ – частота, рад/с; f – циклическая частота, Гц; φ_0 – начальная фаза исходного колебания, рад; Ω – частота модулирующих колебаний, рад/с; m_a – глубина модуляции, характеризующая степень изменения амплитуды:

$$m_a = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}}, \quad (3)$$

где A_{\max} и A_{\min} – максимальное и минимальное значения амплитуды, м.

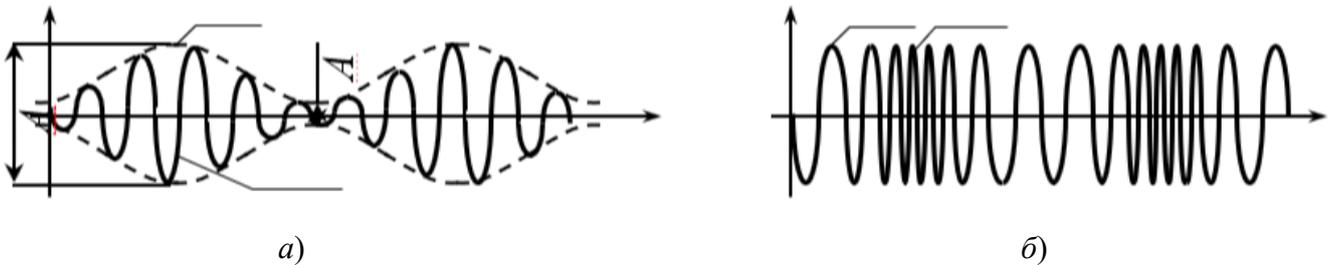


Рис. 1. Осциллограммы амплитудно- (а) и частотно- (б) модулированного сигнала

Fig. 1. Oscillograms of the amplitude (a) and frequency (b) modulated signal

Осциллограммы амплитудно- и частотно- модулированного сигнала (рис. 1) представляет собой сумму трех гармонических колебаний с частотами ω , $(\omega + \Omega)$ и $(\omega - \Omega)$. Колебание частотой ω называется несущим, его амплитуда равна амплитуде A_0 исходного колебания. Две другие частоты называются боковыми, амплитуда каждого из этих колебаний равна $m_a A_0 / 2$. Присутствие в спектре амплитудно-модулированного сигнала гармонических колебаний с частотой способствует

вовлечению в процессы поглощения ультразвука более крупных дислокаций, чем в случае при использовании немодулированного сигнала с фиксированной частотой ω . При частотной модуляции модулирующий сигнал вызывает изменения мгновенных значений частоты, не влияя на амплитуду колебаний. При модуляции синусоидальным сигналом частота колебаний изменяется по закону:

$$\Omega = \omega_n + \Delta\omega \cos(\Omega\tau), \quad (4)$$

где ω_n – несущая частота, рад/с; $\cos(\Omega t)$ – определяет форму модулирующего сигнала; $\Delta\omega$ – девиация частоты, представляющая собой амплитуду отклонения частоты ω от несущей частоты.

Полоса частот частотно-модулированного колебания зависит от величины $m_{\text{ч}} = \Delta\omega/\Omega$, которая называется индексом частотной модуляции. Полную ширину полосы частот, занимаемую частотно-модулированным колебанием с девиацией $\Delta\omega$ и частотной модуляцией Ω , можно считать равной $2(\Delta\omega + \Omega)$. Эта полоса шире, чем при амплитудной модуляции колебаний. Широкий спектр частот, занимаемый частотно-модулированным колебанием, очевидно, может способствовать и значительному расширению диапазона размеров объектов, способных к поглощению энергии ультразвука. Так, присутствие в этом спектре колебаний с минимальной частотой, как было показано выше, воздействует на объекты относительно большого размера. В то же время звуковое давление пропорционально колебательной скорости частиц, а та, в свою очередь – частоте колебаний и амплитуде колебательного смещения частиц. Поэтому наличие в спектре колебаний с максимальной частотой должно способствовать вовлечению в процессы поглощения ультразвука объектов относительно малого размера.

Результаты исследований

Эффективность методов обеспечения заданного уровня ТОН и фазового состава, в том числе – эффективность атермического снятия (релаксации) остаточных напряжений, оценивали в процессе УЗ обработки алюминиевых нежестких тонкостенных образцов из двух термоупрочняемых сплавов: ковочного сплава повышенной пластичности АК6 и жаропрочного сплава высокой прочности Д16. Оба сплава находят широкое применение при изготовлении деталей летательных аппаратов. Исследования осуществляли с использованием разработанной оригинальной установки генерации УЗ волн [11]. В процессе эксперимента с ЭВМ поступают сигналы частотой 22 кГц на оба канала. Данная установка позволяет осуществлять модуляцию УЗ сигнала второго канала. В серии экспериментов форма сигнала второго канала изменяли на синусоидальную, прямоугольную и треугольную с помощью ПЭВМ. Кроме того, в процессе исследований изменяли фазу колебаний сигнала второго канала с 0 на 90°. По данным ранее проведенных исследований это может обеспечить более эффективную релаксацию ТОН в процессе обработки. Примеры подаваемых сигналов приведены на рис. 2 – 4.

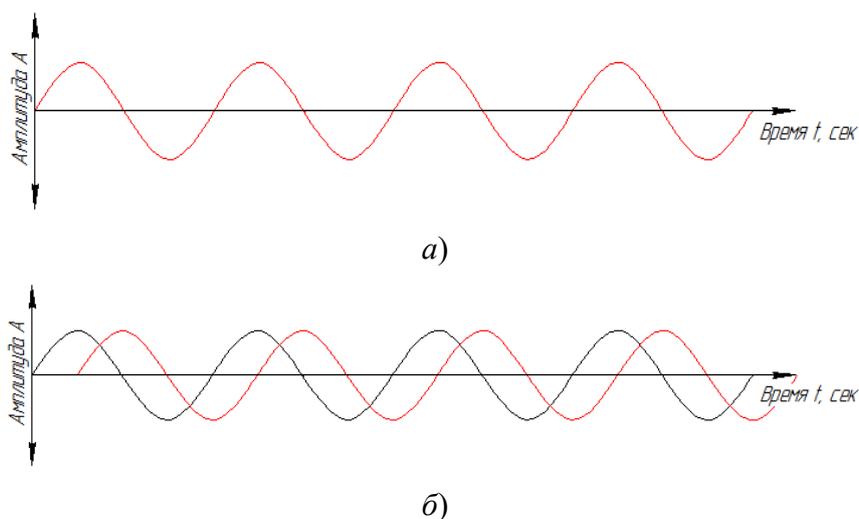


Рис. 2. Выходной сигнал при синусоидальной форме сигнала 2 канала:
а – фаза 0°; б – фаза 90°

Fig. 2. Output signal with a sinusoidal waveform of the 2nd channel:
а – phase 0°; б – phase 90°

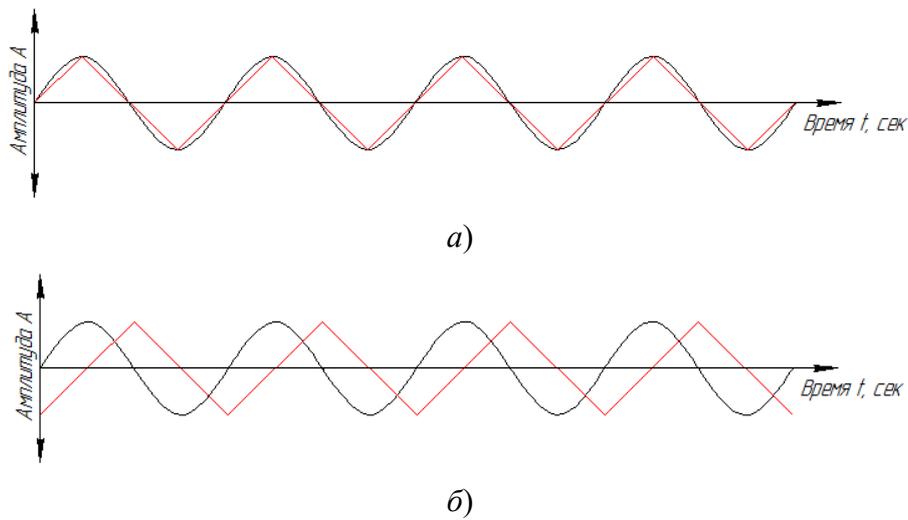


Рис. 3. Выходной сигнал при треугольной форме сигнала 2 канала:
a – фаза 0° ; *b* – фаза 90°

Fig. 3. Output signal with a triangular waveform of the 2nd channel:
a – phase 0° ; *b* – phase 90°

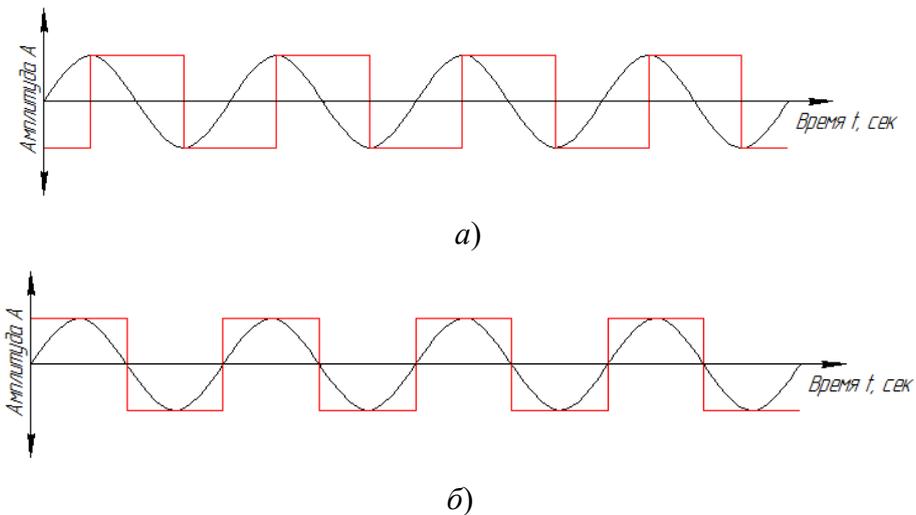


Рис. 4. Выходной сигнал при квадратной форме сигнала 2 канала:
a – фаза 0° ; *b* – фаза 90°

Fig. 4. Square waveform output of the 2nd channel:
a – phase 0° ; *b* – phase 90°

Анализ номенклатуры деталей, выпускаемых предприятиями аэрокосмической отрасли и приборостроения в нашей стране, позволил выявить ряд деталей и их элементов, процесс изготовления которых со снятием припуска вызывает наибольшие затруднения. Примерами таких деталей являются тонкостенные стенки приборных панелей, корпуса приборов,

крышки, выполняющие роль радиатора. Обобщив нежесткие элементы в анализируемой выборке, осуществлено разделение их на две основные группы: стенки с соотношением толщины к высоте 1:10 и 1:20 (рис. 5). Длина таких элементов варьируется от 10 до 300 мм, но большая их часть имеет длину не более 100 мм.

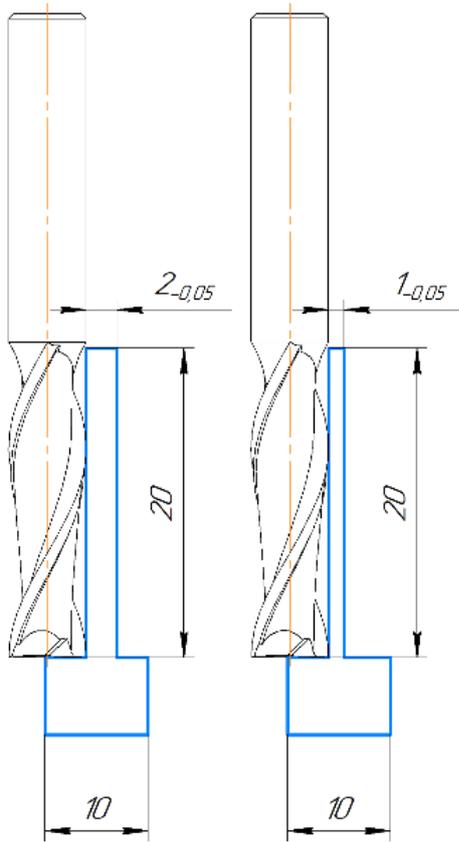


Рис.5. Исследуемые образцы с соотношением толщины S к высоте L 1:10 и 1:20

Fig. 5. The studied samples with a ratio of thickness S to height L of 1:10 and 1:20

Исходные данные для назначения режима выбирались из каталогов производителей инструмента, в данном случае ГК ХАЛТЕК. Была выбрана фреза ХАЛТЕК MA2NNN100 070 000, двузубая, диаметром $D_f = 10$ мм, с количеством зубьев $z = 2$; с длиной фрезы $l_1 = 72$ мм, с длиной режущей кромки $l_2 = 25$ мм, материал фрезы VHM (ультра мелкодисперсный твердый сплав без покрытия). Использовали СОЖ на водной основе (10%-ый раствор концентрата Simcool). Эксперименты выполняли на обрабатывающем центре DMU 50 esoline. После завершения цикла фрезерования стенки осуществлялось измерение положения обработанной поверхности при помощи контактного датчика с оптической передачей сигнала Renishaw OMP 40,

оснащенного рубиновым стилусом диаметром 6 мм. ТОН первого рода в ПС обработанных деталей измеряли при помощи измерительно-вычислительного комплекса СИТОН-АРМ.

Фазовый состав материала в поверхностном слое обработанных образцов определяли рентгеновским методом на измерительном комплексе «Рикор-7». Полученные данные обрабатывали на ЭВМ с использованием программы MD-10. В результате обработки была получена экспозиция со значениями стандартного угла дифракции 2θ по горизонтальной оси и интенсивности пиков I по вертикальной. В процессе измерений значения углов дифракции сравнивали с эталонными значениями с помощью программы Match!, имеющей достаточно обширную базу данных неорганических веществ. Изменения фазового состава ПС оценивали по соотношению фаз Cu_2FeAl_7 и CuMgAl_2 . Соотношение фазы Cu_2FeAl_7 к CuMgAl_2 определяли по формуле:

$$k = \frac{I(\text{Cu}_2\text{FeAl}_7)_1 + I(\text{Cu}_2\text{FeAl}_7)_2}{I(\text{CuMgAl}_2)_1 + I(\text{CuMgAl}_2)_2}, \quad (5)$$

где $I(\text{Cu}_2\text{FeAl}_7)_1$, $I(\text{CuMgAl}_2)_1$ – интенсивность пиков Cu_2FeAl_7 и CuMgAl_2 фаз при угле наклона трубки $19,7^\circ$; $I(\text{Cu}_2\text{FeAl}_7)_2$, $I(\text{CuMgAl}_2)_2$ – интенсивность пиков Cu_2FeAl_7 и CuMgAl_2 фаз при угле наклона трубки $27,3^\circ$.

Изменение данного соотношения в процессе формообразования нежестких деталей свидетельствует о фазовых превращениях в ПС, возникающих под действием теплосилового напряжения процесса обработки. Оценка соотношения этих фаз позволяет оценить, какие явления происходят в поверхностном слое обрабатываемых заготовок: упрочнение или разупрочнение.

Фрезерование заготовок осуществляли на максимально возможных режимах:
 $v = 300$ м/мин; $S_z = 0,12$ мм/зуб.

Усредненные результаты исследований представлены в табл.1 и табл. 2.

1. Влияние УЗК на фазовый состав ПС обработанных тонкостенных образцов

2. The influence of ultrasonic testing on the phase composition of PS of processed thin-walled samples

Сплав	Форма и фаза сигнала УЗ колебаний						
	Без УЗК	Синус + Синус.		Синус + Квадрат		Синус + Треугольник	
		0 °	90 °	0 °	90 °	0 °	90 °
Соотношение фаз Cu ₂ FeAl ₇ / CuMgAl ₂							
АК6	69/31	61/39	60/40	63/37	53/47	56/44	57/43
		-12 %	-13 %	-9 %	-23 %	-19 %	-17 %
Д16	51/49	45/55	46/54	43/57	37/63	41/59	42/58
		-12 %	-10 %	-16 %	-27 %	-20 %	-18 %

2. Влияние УЗК на ТОН в ПС обработанных нежестких тонкостенных образцов

2. The influence of ultrasonic testing on the TON in the PS of processed non-rigid thin-walled samples

Сплав	Глубина замера, мкм	Форма и фаза сигнала УЗ колебаний						
		Без УЗК	Синус + Синус		Синус + Квадрат		Синус + Треугольник	
			0 °	90 °	0 °	90 °	0 °	90 °
Технологические остаточные напряжения, МПа								
АК6	80	126	99	97.5	93	88	102	95
			-21 %	-23 %	-26 %	-30%	-19 %	-25 %
	150	-178	-151	-149	-144	-139	-153	-147
			-15 %	-16 %	-19 %	-22 %	-14 %	-17 %
Д16	80	120	97	91	93	88	98	94
			-19 %	-24 %	-22 %	-27 %	-18 %	-22 %
	150	-172	-147	-139	-144	-139	-149	-145
			-15 %	-19 %	-16 %	-19 %	-13 %	-16 %

Соотношение фаз в ПС при обработке заготовок из сплава АК6 с введением в зону обработки УЗ сигнала с синусоидальной формой сигнала второго канала мало меняется от наличия смещения на 90° фазы колебаний. Поэтому малы и изменения ТОН (табл. 2) при обработке заготовок из сплава АК6 с введением в зону обработки энергии УЗ-поля с синусоидальной формой сигнала второго канала со смещением на 90° фазы колебаний. Введение в зону обработки энергии УЗ поля позволяет существенно уменьшить остаточные напряжения, возникающие в заготовке в процессе резания по сравнению с результатами обработки заготовок без УЗК. Эффективность релаксации ТОН от использования энергии модулированного УЗ поля с синусоидальной формой сигнала составляет порядка 20 % на глубине 40...200 мкм.

При обработке заготовки без наложения УЗК средняя величина ТОН на глубине ПС в 80 мкм составляет 126 МПа, на 150 мкм – 178 МПа. С использованием сигнала второго канала синусоидальной формы без смещения фазы колебаний – 99 МПа на глубине ПС в 80 мкм, на глубине 150 мкм – 151 МПа (уменьшение ТОН на 23 %). Со смещением фазы колебаний на 90° средняя величина ТОН на глубине поверхностного слоя в 80 мкм составляет 97,5 МПа, на 150 мкм – 149 МПа. Это несколько меньше, чем без смещения.

В результате наложения УЗ волн на зону формообразования детали меняется характер контактных взаимодействий на рабочих поверхностях режущего инструмента с заготовкой, приводящих к уменьшению деформаций при стружкообразовании, а также сил резания.

Все это вызывает уменьшение сил трения, снижение контактной температуры в зоне резания и, соответственно, способствует уменьшению величины ТОН. Снижается сопротивление ПС металла пластической деформации, поэтому при малой статической силе удается осуществлять высокоэффективную обработку. Улучшаются условия проникновения СОЖ в зону резания, что также позволяет уменьшить температуру в зоне контакта. Кроме того, учитывая особенности обработки нежестких заготовок со съемом малых припусков, может возникать явление кратковременной релаксации ТОН в промежутках между холостыми ходами.

При замене материала заготовки с АК6 на сплав Д16 введение в зону обработки УЗ сигнала второго канала без смещения фаз наблюдается большее увеличение в ПС готовой детали фазы Cu_2FeAl_7 и уменьшение фазы CuMgAl_2 (табл. 1). Данный результат может быть объяснен тем, что УЗ сигнал синусоидальной формы, вероятно, оказывает более существенное влияние на свободные атомы железа, давая им энергию для того, чтобы занять вакансии или же, чтобы преодолеть потенциальный барьер, создаваемый соседними атомами.

Смещение фазы колебаний на 90° ведет к росту в ПС материала обрабатываемой детали фазы CuMgAl_2 . Рост этой фазы, на наш взгляд, связан с тем, что УЗК, модулированные со смещением фазы на 90° , оказывают в отличие от сплава АК6, большее воздействие на атомы магния, давая им необходимое количество энергии для занятия свободных вакансий. Разница результатов для разных сплавов может быть объяснена различиями в их химическом составе, наличием инородных примесей, микроструктурой обрабатываемых материалов, а также соотношениями амплитуд и частот колебаний в технологической системе при выбранных режимах обработки и УЗК.

Как видно из данных табл. 2 при замене материала на Д16 заметно большее уменьшение ТОН, чем у возникающих в процессе изготовления в аналогичных условиях деталей из сплава АК6. Эффективность релаксации ТОН от использования энергии УЗ поля с синусоидальной формой сигнала без смещения фазы

колебаний составляет 21 % на глубине 40...200 мкм. При обработке заготовок из сплава Д16 без УЗК средняя величина ТОН на глубине ПС в 80 мкм составляет 120 МПа, на 150 мкм – 172 МПа. С использованием сигнала второго канала синусоидальной формы без смещения фазы колебаний на глубине 80 мкм средняя величина ТОН уменьшается до 97 МПа, на 150 мкм – до 147 МПа. Смещение фазы колебаний сигнала второго канала на 90° приводит к уменьшению величины ТОН – 139 МПа.

Изменения соотношения фаз колебаний при обработке заготовок из сплава АК6 с введением в зону обработки энергии УЗ сигнала с квадратной формой сигнала второго канала приводит к некоторому увеличению в составе ПС материала готовой детали фазы CuMgAl_2 , по сравнению с использованием сигнала синусоидальной формы. Как описывалось выше, это может быть результатом воздействия интенсивных микроударов режущего инструмента на ПС материала детали и более эффективным процессом релаксации в результате заполнения вакансий кристаллической решетки свободными атомами магния. При смещении фазы УЗ сигнала на 90° в ПС материала заготовки заметен больший рост фазы Cu_2FeAl_7 . Смещение сигнала на 90° расширяет количество дислокаций, с которыми УЗ волна от первого канала входит в резонанс. В связи с этим процесс релаксации ТОН интенсифицируется за счет вовлечения большего количества дислокаций. А так как в процентном содержании в составе сплава Д16 железа больше магния, то атомы железа, войдя в резонанс с излучаемой волной и получив достаточное количество энергии, могут занять свободные вакансии, которые образовались из-за пластической деформации в процессе обработки.

Изменения ТОН при обработке заготовок из сплава АК6 с введением в зону обработки модулированного УЗ поля с квадратной формой сигнала от второго канала представлены в табл. 2. Из анализа результатов следует, что введение в зону обработки энергии модулированного УЗ поля с квадратной формой второго сигнала позволяет существенно уменьшить остаточные напряжения, возникающие в

заготовке в процессе резания. Эффективность релаксации ТОН от использования энергии УЗ поля с квадратной формой УЗ сигнала без смещения фазы составляет 26 % на глубине 40 – 200 мкм.

При обработке заготовки из сплава АК6 без наложения УЗ колебаний средняя величина ТОН на глубине ПС в 80 мкм составляет 126 МПа, на 150 мкм – 178 МПа; с использованием сигнала второго канала квадратной формы без смещения фазы колебаний на глубине 80 мкм средняя величина ТОН составляет 93 МПа, на 150 мкм – 144 МПа.

Из анализа результатов следует, что введение в зону обработки сигнала второго канала с квадратной формой (табл. 2) приводит к увеличению фазы CuMgAl_2 , что сопровождается упрочнением ПС и повышением прочностных характеристик нежесткой детали в целом. Это, как уже отмечалось выше, может быть связано с изменением контактных взаимодействий при обработке и воздействием режущего инструмента на ПС. Как упоминалось ранее, можно предположить о возможном влиянии УЗК на атомы магния, энергии которых вполне достаточно для перемещения и занятия ими свободных вакансий в кристаллической решетке.

Анализ результатов показывает, что введение в зону обработки сплава Д16 энергии модулированного УЗ поля с квадратной формой второго сигнала позволяет уменьшить остаточные напряжения. При использовании сигнала второго канала квадратной формы без смещения фазы колебаний на глубине 80 мкм средняя величина ТОН составляет 93 МПа, на глубине 150 мкм – 144 МПа.

Введение в зону обработки сигнала второго канала треугольной формы без смещения фазы колебаний вызывает на глубине 80 мкм возникновение ТОН в 93 МПа, на глубине 150 мкм – 144 МПа.

Наличие модулированной энергии УЗ поля с сигналом от второго канала треугольной формой без смещения фаз УЗ колебаний приводит к увеличению в ПС детали из сплава АК6 фазы CuMgAl_2 примерно в тех же пределах, что и при использовании УЗ сигнала синусоидальной формы. Однако, по сравнению с

использование сигнала синусоидальной формы, замечен существенно меньший её рост. Такой результат может быть объяснен тем, что треугольная форма сигнала схожа с синусоидальной формой, но всё же имеет свои отличия, что вызывает лишь незначительное увеличение фазы CuMgAl_2 . При этом лишь на 19 % уменьшаются ТОН (глубина 40...200 мкм), что является наименьшей величиной среди трех рассмотренных сигналов.

Изменения соотношения фаз УЗК при обработке заготовок из сплава Д16 с введением в зону обработки ультразвукового сигнала с треугольной формой сигнала второго канала приводит к незначительным изменениям фазового состава в ПС. Объем фазы Cu_2FeAl_7 увеличивается, а CuMgAl_2 уменьшается. Смещение введения в зону обработки энергии модулированного УЗ поля приводит к некоторому уменьшению величину растягивающих ТОН на глубине ПС до 90 мкм.

Данные результаты мало отличаются от полученных при введении в зону обработки УЗК при обработке заготовок из сплава АК6.

Заключение

Анализ выполненных исследований позволяет сделать вывод, что наиболее эффективным является наложение модулированных УЗК, при котором сигнал первого источника имеет синусоидальную, а сигнал второго источника имеет квадратную форму и смещён по фазе на 90° . Дальнейшие исследования с изменением положений обработанных поверхностей тонкостенных деталей контактным датчиком Renishaw OMP40 показали, что коробление уменьшилось на 30...40 %. Существенной разницы в результатах обработки заготовок из сплавов Д16 и АК6 не зафиксировано

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Клушин М.И. Технологические свойства новых СОЖ для обработки резанием / под ред. М.И. Клушина. М.: Машиностроение, 1979. 192 с.
2. Худобин Л.В. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: справочник / под общ. ред. Л.В. Худобина. М.: Машиностроение, 2006. 544 с.

3. **Бергман Л.** Ультразвук и его применение в науке и технике. М.: Иностранная литература, 1957. 728 с.
4. **Кумабэ Д.** Вибрационное резание / Пер. с яп. С.Л. Масленникова, под ред. И.И. Портнова и В.В. Белова. М.: Машиностроение, 1985. 424 с.
5. **Марков А.И.** Ультразвуковая обработка материалов. М.: Машиностроение, 1980. 237с.
6. **Подураев В.Н.** Резание труднообрабатываемых материалов. М.: Машиностроение, 1974. 252 с.
7. **Справочник** технолога / под общ. ред. А.Г. Сулова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.
8. **Серия ULTRASONIC** [Электронный ресурс] // URL: t-sistem.ru/netcat_filles/multifile/2295/pugru13_ultrasonic_pdf_data.pdf (дата обращения 27.02.2022)
9. **Ультразвуковые технологии** [Электронный ресурс] // URL: https://carbide-tool.ru/ultrasonic_technology_pdf_data.pdf (дата обращения 27.02.2022)
10. **Киселев Е.С.** Интенсификация процессов механической обработки рациональным использованием энергии ультразвукового поля. Ульяновск: УлГТУ, 2003. 186 с.
11. **Киселев Е.С., Назаров М.В.** Особенности технологии изготовления нежестких корпусных деталей: монография / под общ. ред. Е.С. Киселева. М.: РУСАЙНС, 2022. 218с.
12. **Тяпунина Н.А.** Поперечное скольжение дислокации в ультразвуковом поле и влияние на этот процесс амплитуды и частоты ультразвука, ориентации образца и коэффициента динамической вязкости / Н.А. Тяпунина, Г.В. Бушуева, М.И. Силис, Д.С. Подсобляев и др. // Физика твердого тела. Т. 45. № 5, 2003. С. 836–841.

REFERENCES

1. Klushin M.I. Technological properties of new lubricating and cooling fluids (LCF) for machining operations /

edited by M.I. Klushin. Moscow: Mashinostroenie, 1979. 192 p.

2. Khudobin L.V. Lubricating and cooling technological means and their use in cutting processing: Handbook / under the general editorship of L.V. Khudobin. Moscow: Mashinostroenie, 2006. 544 p.

3. Bergman L. Ultrasound and its application in science and technology. Moscow: Inostrannaya literatura, 1957. 728 p.

4. Kumabe, D. Vibration cutting / Translated from the Japanese by S.L. Maslennikov; edited by I.I. Portnov and V.V. Belov. Moscow: Mashinostroenie, 1985. 424 p.

5. Markov A.I. Ultrasonic processing of materials. Moscow: Mashinostroenie, 1980. 237p.

6. Poduraev V.N. Cutting of hard-to-work materials. Moscow: Mashinostroenie, 1974. 252 p.

7. Technologist's Reference Book // under the general editorship of A.G. Suslov. Moscow: Innovative Engineering, 2019. 800 p.

8. ULTRASONIC Series [Electronic resource] // URL: t-sistem.ru/netcat_filles/multifile/2295/pugru13_ultrasonic_pdf_data.pdf (accessed 02/27/2022)

9. Ultrasonic technology. [Electronic resource] // URL: http://carbide-tools.ru/ultrasonic_techny_pdf_data.pdf (accessed 02/27/2022)

10. Kiselev E.S. Intensification of the processes of mechanical treatment using the ultrasonic field energy. Ulyanovsk: UISTU, 2003. 186 p.

11. Kiselev E.S., Nazarov M.V. Features of the technology for manufacturing non-rigid body parts: monograph / under the general editorship of E.S. Kiselev. Moscow: RUSAINS, 2022. 218p.

12. Tyapunina N.A., Bushueva G.V., Silis M.I., Podsoblyayev D.S., et al. Tyapunina N.A. The cross slip of a dislocation in an ultrasound field and its dependence on the ultrasound amplitude and frequency, sample orientation, and dynamic viscosity. vol. 45. Issue 5. 2003. pp. 836–841.

Статья поступила в редакцию 19.02.2025; одобрена после рецензирования 25.02.2025; принята к публикации 10.03.2025.

The article was submitted 19.02.2025; approved after reviewing 25.02.2025; assepted for publication 10.03.2025.