

Научная статья

УДК 621.7/620.3

doi: 10.30987/2223-4608-2022-9-10-17

## Новые технологии изготовления нежестких плоскостных деталей из авиационных материалов

Евгений Степанович Киселев, д.т.н.

Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия  
kcs.ulstu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9334-4077>

**Аннотация.** Рассмотрен комплекс вопросов, связанных с новыми технологиями изготовления нежестких тонкостенных плоскостных деталей из авиационных материалов. Для уменьшения возможных деформаций и повышения качества предложено использовать энергию модулированного ультразвукового поля.

**Ключевые слова:** нежесткие детали, модулированный ультразвук, титановые и алюминиевые сплавы

**Для цитирования:** Киселев Е.С. Новые технологии изготовления нежестких плоскостных деталей из авиационных материалов. // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №9 (135). – С. 10-17. doi: 10.30987/2223-4608-2022-9-10-17

Original article

## New technologies for the manufacture of non-rigid planar parts from aviation materials

Evgeny S. Kiselev, Dr. Sc.Tech.

Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia  
kcs.ulstu@mail.ru

**Annotation.** A set of issues related to new technologies for the manufacture of non-rigid thin-walled planar parts from aviation materials is considered. To reduce possible deformations and improve quality, it is proposed to use the energy of the modulated ultrasonic field.

**Keywords:** non-rigid parts, modulated ultrasound, titanium and aluminum alloys

**For citation:** Kiselev E.S. New technologies for the manufacture of non-rigid planar parts from aviation materials. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no. 9 (135), pp. 10-17. doi: 10.30987/2223-4608-2022-9-10-17

Особенностью современного механообрабатывающего производства является необходимость изготовления все увеличивающегося количества сложных и нежестких, тонкостенных деталей, используемых в различных машинах и механизмах, прежде всего в летательных аппаратах (ЛА) и в высокоскоростном наземном и водном транспорте. Основную часть таких деталей изготавливают из титановых и алюминиевых сплавов.

Разработка технологического процесса изготовления нежестких деталей отличается почти полным отсутствием у производителей режущего инструмента (РИ) рекомендаций по изготовлению нежестких деталей из труднообрабатываемых титановых и, характеризующихся пониженной температурой плавления

и существенно меньшей прочностью в сочетании с хорошей обрабатываемостью, алюминиевых сплавов.

Изготовление деталей из таких авиационных материалов сопряжено с опасностью возникновения в поверхностном слое (ПС) технологических остаточных напряжений (ТОН), величина которых бывает достаточной для объемного коробления и пространственного изменения взаимного положения обработанных поверхностей в процессе их временной релаксации. Это объясняется малой теплопроводностью титановых сплавов (в 4-5 раз меньшей, чем у сталей), или близостью значений контактных температур в зоне резания к температуре плавления (алюминиевые сплавы).

При этом вся теплота, возникающая в зоне резания, распределяется в объеме тонкостенных нежестких деталей, который существенно меньше, в сравнении с объемом массивных деталей аналогичного назначения. На практике это приводит к необходимости уменьшения теплосиловой напряженности за счет снижения элементов режима, а в некоторых случаях даже к подборке опытным путем последовательности изготовления каждого отдельного элемента нежестких деталей.

Механическую обработку заготовок деталей, обладающих сложной пространственной формой, чаще всего ведут на современных обрабатывающих центрах, для которых подобные потери производительности недопустимы. Достаточно часто для исправления формы готовых деталей приходится прибегать

к включению в техпроцесс изготовления операции правки, что увеличивает производственный цикл и себестоимость готовой продукции.

В числе новых перспективных технологий изготовления плоских нежестких деталей из удачных решений последнего времени следует упомянуть разработку фирмы SCHUNK для закрепления плоских нежестких деталей – SCHUNK-VERO-S Aviation [1].

Технология обработки нежестких заготовок с использованием данной разработки предполагает прямое закрепление заготовки на модулях системы VERO-S. Для этого в заготовку вворачиваются специальные пальцы, которые и обеспечивают соединение заготовки и приспособления. Способы крепления пальцев могут быть различными (рис. 1).

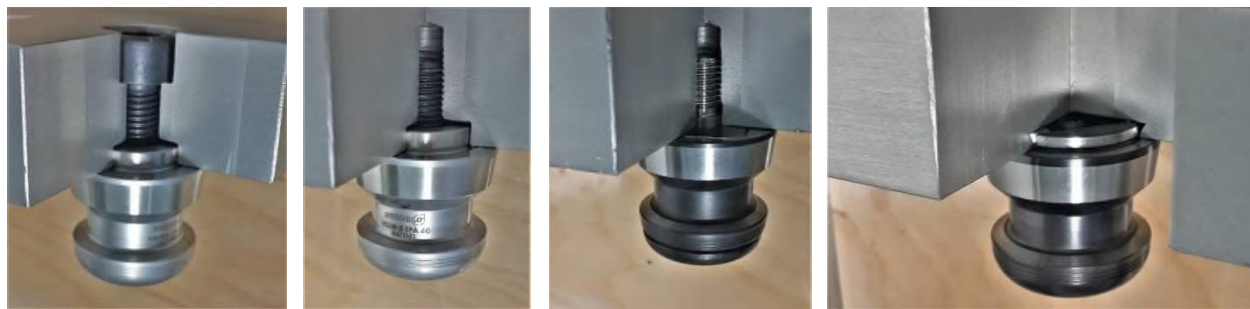


Рис. 1. Способы крепления базирующих пальцев системы SCHUNK VERO-S Aviation

Рассмотрим особенности использования данной системы в действующем производстве на примере директивного технологического процесса изготовления детали типа «АВИАЦИОННЫЙ ЛЮК».

Из курса технологии машиностроения известно о принципе базирования по плоскости, цилиндрическому и срезанному пальцу. Именно этот принцип применяется в системе VERO-S Aviation. Система включает в себя следующие модули:

1. Модуль типа *A* – фиксированная нулевая точка.

2. Модуль типа *B* – модуль, способный перемещаться только вдоль одной оси.

Выполняет функцию срезанного пальца для защиты от проворота.

3. Модуль типа *C* – модуль, перемещающийся в двух осях *X* и *Y*. В сочетании с модулями *A* и *B* усиливает жёсткость закрепления заготовки.

Вышеперечисленные модули *A*, *B* и *C* имеют одинаковую высоту. При закреплении заготовки они образуют силовой треугольник *ABC*, определяющий позиционирование и

нулевую точку заготовки при обработке.

4. Модуль типа *D – 3D* модуль, подвижный во всех осях. Способен компенсировать движения заготовки по осям *X*, *Y*, *Z* на  $\pm 6$  мм и по углу наклона вдоль оси *Z* на  $\pm 2^\circ$  (рис. 2).

Типовой техпроцесс предполагает всего 3 установка (рис. 3):

– OP10 – подготовка баз для зажимных штифтов и черновая разгрузка стороны №1, может выполняться как в прихватах или тисках, так и с использованием системы VERO-S Aviation. Однако сначала будет необходимо подготовить базы и пос-тавить;

– OP20 – обработка контура, черновая и получистовая и чистовая обработка поверхности №2 с разбивкой припуска и снятием напряжений с заготовки после съема определенного припуска: обработка контура и снятие напряжений; съём 50 % припуска и снятие ТОН; обработка со съемом припуска 5,0 мм, 3,0 мм и 1,5 мм.

– OP30 – чистовая обработка стороны №1 без снятия напряжений, т.к. съём оставленного после первого установка чистового припуска не несёт с собой поводок.

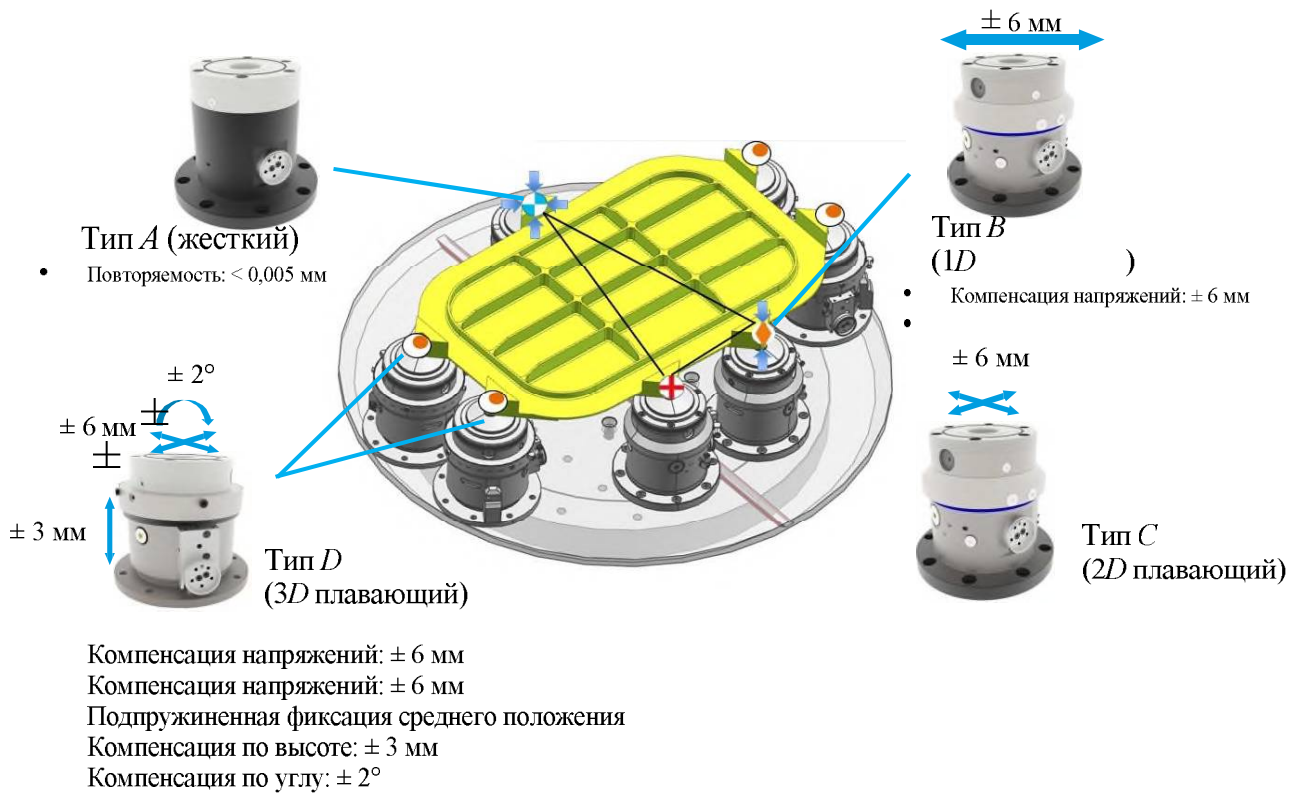


Рис. 2. Расположение базирующих и плавающих пальцев

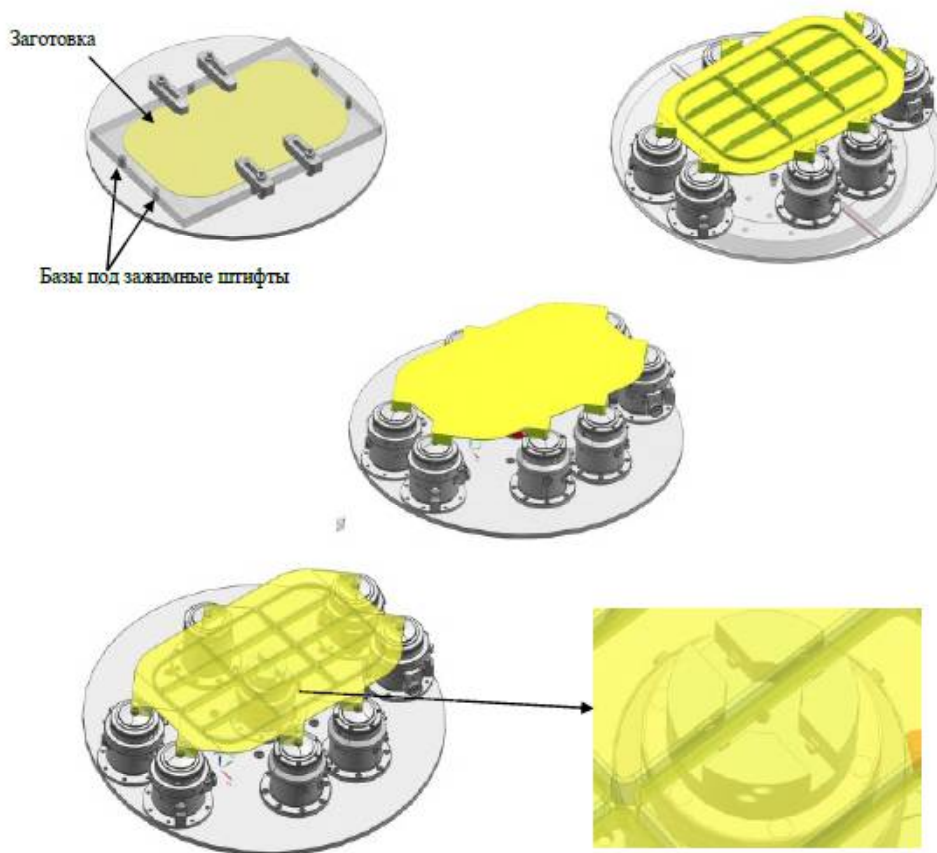


Рис. 3. Типовой технологический процесс изготовления нежесткой детали «лок» с использованием технологической оснастки VERO-S Aviation

Таким образом, компенсация основных поводов предполагается на 1-м и 2-м установках. В случае обработки тонкостенных заготовок система предусматривает вакуумные или механические поддержки.

Система VERO-S Aviation уже нашла применение у ведущих мировых производителей в аэрокосмической промышленности: Boeing; Lockheed Martin Aeronautics; GKN; Leonardo и др. [2].

Данная разработка является весьма эффективным средством уменьшения вероятности возникновения короблений тонкостенных длинномерных заготовок, однако высокая ее стоимость сдерживает широкое использование в действующем машиностроительном производстве России. Решение всех проблемных вопросов только за счет хотя и высокоэффективных, но не всегда рентабельных в действующем производстве систем VERO-S Aviation не всегда приносит желаемый экономический эффект.

Интенсивным методом снижения теплосилового напряжения процесса резания и уменьшением вероятности объемного коробления и пространственного изменения взаимного положения обработанных поверхностей является ввод в зону формообразования энергии ультразвукового (УЗ) поля.

Ранее в результате многочисленных исследований, выполненных в различных странах, возможность реализации размерной механической обработки с ультразвуковыми колебаниями (УЗК) ограничивалось необходимостью создания специальных приспособлений или установок для наложения энергии УЗ поля на заготовку, инструмент, СОЖ, детали станка или технологической оснастки [3 – 6]. Однако в настоящее время компанией DMG MORI разработана и серийно выпускается линейка из 18 моделей станков серии ULTRASONIC, в которой в конструкцию шпиндельного узла встроено устройство наложения УЗК на режущий инструмент [7].

Подобными по конструктивному исполнению являются и станки AXILE Machining. В этих станках УЗК накладываются на режущий инструмент вдоль его продольной оси, что до 30...40 % уменьшает силы резания, а следовательно, и контактные температуры в зоне резания. Такие станки находят широкое применение в аэрокосмической и автомобильной промышленности Северной Америки и Западной Европы. Одновременно серийно выпускаются УЗ оправки (компания Altrasonic, CRENO Industry, Pulchertool и др.), применение которых допустимо на обрабатываемых центрах с ЧПУ оснащенных шпинделями с конусом ISO 40 (SK40,

BT40) [8].

Следует отметить, что до сих пор, технологические возможности введения в зону обработки энергии УЗ поля не учитываются при разработке программных продуктов для многоцелевых обрабатывающих центров и с применением систем автоматизированного проектирования программ управления, в том числе для автоматизации процессов, требующих многократного повторения. Поэтому потенциал последних еще далек от полной реализации потенциальных возможностей использования.

Из результатов исследований, выполненных в Ульяновском государственном техническом университете (УлГТУ) известно, что все они весьма чувствительны к модуляции УЗК по амплитуде и частоте [3, 4, 9]. Однако исследования эффективности модуляции УЗК по фазе до настоящего времени малоизвестны. Между тем, такая модуляция с использованием возможностей современных ПЭВМ, может быть реализована с минимальными экономическими затратами.

Эксперименты осуществлялись с использованием вновь разработанной оригинальной установки генерации УЗ волн, которая включает в себя ЭВМ, генерирующей сигнал на два канала  $K1$  и  $K2$ , блока питания для усилителя, внешнего усилителя сигнала, которые подключается к ультразвуковой системе (УЗС). Принципиальная схема установки для генерации ультразвуковых волн представлена на рис. 4.



Рис. 4. Принципиальная схема установки для генерации УЗ волн

Отличие данной УЗ установки от ранее разработанных для частотной и амплитудной модуляции выходного УЗ сигнала [3] заключается в способности осуществлять новые виды модуляции – по форме сигнала и фазе от двух источников колебаний.

Особенность данной схемы наложения УЗК заключается в том, что заготовка, установленная между излучателем и отражателем, является звеном колебательной системы. При этом размеры излучателя и отражателя рассчитаны так, чтобы на заготовке возникла максимум амплитуды стоячей волны.

Сообщение УЗК пьезокерамическим преобразователям осуществляется от ультразвукового генератора УЗГ-10022-05 с частотой  $f = 22$  кГц, обеспечивающего для используемой конструкции приспособления амплитуду колебаний 8...10 мкм.

В качестве программного обеспечения была выбрана программа Soundcard Score, которая предоставляет достаточно широкий спектр возможностей по генерации сигнала различных частот и их продолжительности, форм сигнала, присутствует встроенный осциллограф.

Априори полагалось, что в процессе эксперимента с ЭВМ поступают сигналы частотой 22 кГц на оба канала. Однако, в

отличие от ранее разработанных в Ульяновском государственном техническом университете [3], данная установка, выполненная по принципиальной схеме по рис. 4, позволяет осуществлять модуляцию УЗ сигнала второго канала. Форма сигнала второго канала с помощью ПЭВМ изменяется на синусоидальную, прямоугольную и треугольную. Кроме того, имеется возможность изменять фазу колебаний сигнала второго канала на  $90^\circ$ .

По данным ранее проведенных исследований это должно обеспечить более эффективную релаксацию ТОН в процессе обработки. Примеры подаваемых сигналов приведены на рис. 5.

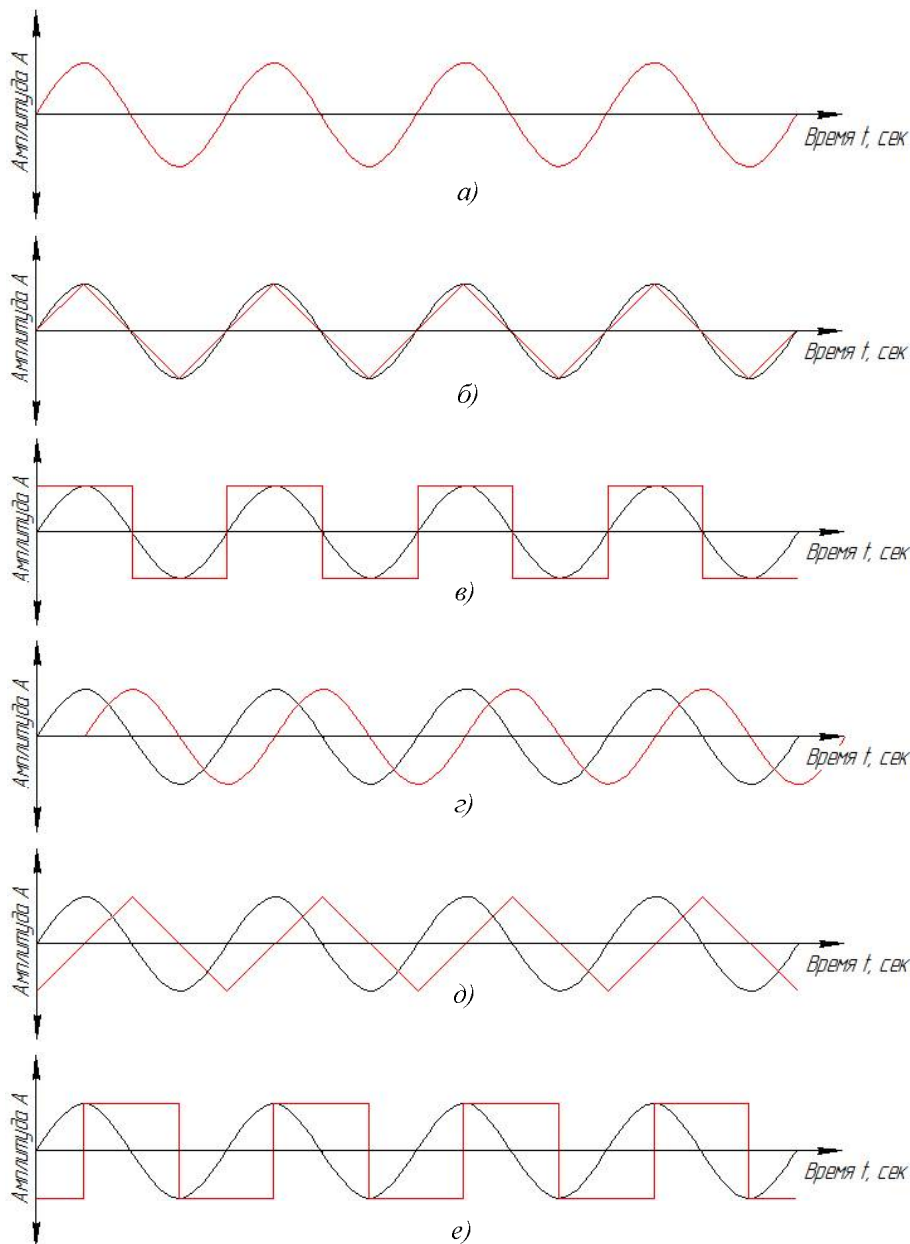


Рис. 5. Выходной сигнал УЗК при форме второго сигнала соответственно:

a)  $0^\circ$ ; б)  $90^\circ$ ; в)  $0^\circ$ ; г)  $0^\circ$ ; д)  $0^\circ$ ; е)  $0^\circ$ ; з)  $0^\circ$ ; и)  $0^\circ$ .

На первом этапе экспериментов были получены регрессионные зависимости технологических остаточных напряжений от режимов резания на глубине 80 мкм, где, по мнению авторов, должны наблюдаться максимальные растягивающие остаточные напряжения. На глубине 150 мкм ожидалось максимальные сжимающие напряжения. Зависимость составляющих сил резания от режимов обработки для материалов образцов будет выглядеть следующим образом:

$$\sigma_{80} = f(v, s_z, b); \quad (1)$$

$$\sigma_{150} = f(v, s_z, b). \quad (2)$$

Условия предварительных экспериментов: обрабатывали образцы из деформируемых алюминиевых (АК6, Д16) и титановых (ВТ6 и ВТ22) сплавов (рис. 6), монолитной твердосплавной фрезой Ø10, с шириной срезаемого слоя  $b = 1$  мм, скоростью резания  $v = 150$  м/мин, рабочей подачей  $s_z = 0,12$  мм/зуб с применением ультразвукового поля частотой  $f = 22\ 000$  кГц.

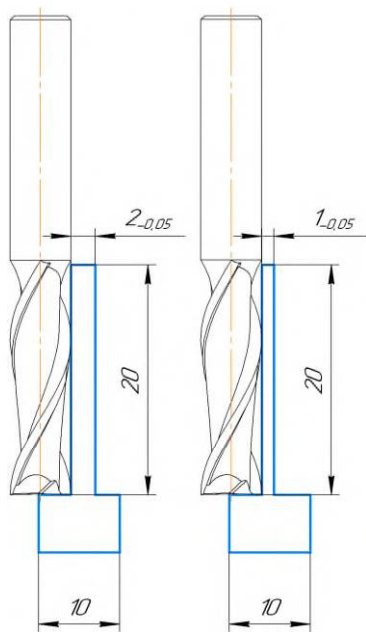


Рис. 6. Исследуемые образцы с соотношением толщины  $S$  к высоте  $L$  1:10 и 1:20

Установка для проведения исследований выполнена на базе универсального фрезерного станка Optimum MT100. Для обработки заготовок применяли концевую фрезу SGS65M: диаметр режущей части  $d_1 = 8$  мм; диаметр хвостовика  $d_2 = 8$  мм; количество зубьев  $z = 3$ ; материал – специальный мелко-зернистый твердый сплав; покрытие Ti-NAMITE-A (алюмонитрид титана).

В качестве СОЖ использовали 10 %-ый водный раствор полусинтетического концентрата фирмы Cimcool.

Для измерения остаточных напряжений в данной серии экспериментов использовали рентгеновский измерительный комплекс «Рикор-4».

Фазовый состав материала в поверхностном слое обработанных образцов также определяли рентгеновским методом, но с помощью рентгеновского измерительного комплекса «Рикор-7». Полученные данные обрабатывались на ЭВМ с помощью программы MD-10, поставляемой вместе с измерительным комплексом «Рикор-7».

Изменение соотношения  $\alpha$ -Ti и  $\beta$ -Ti в процессе формообразования поверхностей нежестких деталей свидетельствует о фазовых превращениях в поверхностном слое, возникающих под действием теплосилового напряженности процесса обработки. Полученная информация позволяет выявить причины формирования технологических остаточных напряжений.

Фаза  $\beta$ -Ti является упрочняющей, увеличение данной фазы свидетельствует о изменении объемно-центрируемой кубической кристаллической решетки (ОЦК). Последнее вызывает увеличение прочностных свойств в поверхностном слое металла заготовки.

Фаза  $\alpha$ -Ti имеет гексагональную плотноупакованную кристаллическую решетку (ГПУ), наличие этой фазы может привести к разупрочнению в поверхностном слое. Положительное влияние  $\alpha$ -Ti заключается в повышении химической стойкости поверхности. Оценка соотношения этих фаз позволяет оценить, какие явления происходят в поверхностном слое обрабатываемых заготовок: упрочнение или разупрочнение.

Соотношение фазы  $\alpha$ -Ti к фазе  $\beta$ -Ti определяли по формуле:

$$k = \frac{I_{\alpha-Ti1} + I_{\alpha-Ti2}}{I_{\beta-Ti1} + I_{\beta-Ti2}},$$

где  $I_{\alpha-Ti1}$ ,  $I_{\beta-Ti1}$  – интенсивность пиков  $\alpha$  и  $\beta$ -фаз при угле наклона трубки  $19,7^\circ$ ;  $I_{\alpha-Ti2}$ ,  $I_{\beta-Ti2}$  – интенсивность пиков  $\alpha$  и  $\beta$ -фаз при угле наклона трубки  $27,3^\circ$ .

Для более наглядного восприятия результаты наложения модулированных УЗК разных форм из алюминиевых сплавов представлены в виде табл. 1 и 2.

**1. Влияние УЗК на технологические остаточные напряжения ПС обработанных тонкостенных образцов**

Сплав	Глубина замера, мкм	Форма 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 %

**2. Влияние УЗК на фазовый состав ПС обработанных тонкостенных образцов**

Сплав	Без УЗК	Форма сигнала УЗ колебаний					
		Синус. + Синус.		Синус. + Квадрат		Синус. + Треугольник	
		0°	90°	0°	90°	0°	90°
Соотношение фаз $Cu_2FeAl_7/CuMgAl_2$							
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 %

По результатам выполненных исследований можно сделать вывод, что наиболее эффективным является наложение модулированных ультразвуковых колебаний, при котором сигнал первого источника имеет синусоидальную форму, а сигнал второго источника имеет квадратную форму и смещён по фазе на 90°. Существенной разницы в результатах обработки заготовок из сплавов Д16 и АК6 не зафиксировано.

Эксперименты с обработкой заготовок из титановых сплавов также подтвердили высокую эффективность введения в зону формообразования энергии модулированного по форме и фазе УЗ сигнала.

**Выводы**

1. Получены регрессионные зависимости для расчёта сил резания и величины ТОН при фрезеровании заготовок из алюминиевых и титановых сплавов при введении УЗК в зону резания. Определена наиболее эффективная форма выходного сигнала ультразвукового генератора – синусоидальная, со смещением фазы УЗ колебания от второго канала на 90°, обеспечивающая максимальное снижение

уровня ТОН в ПС обработанных заготовок.

2. Показана возможность интенсификации процесса окончательной обработки тонкостенных заготовок из алюминиевых и титановых сплавов за счёт введения в зону резания энергии ультразвукового поля.

**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. **Khramov, A., Semdyankin, I., Kiselev, E.** Application of the Modern Stationary Workholding Systems for Increase Capacity and Quality of Non-Rigid Aircraft Parts/ Matec web of Conferences 346, 03076 (2021) ICMTMTE 2021.
2. **Электронный ресурс:** [https:// haltec.bitrix24.ru/~eluYV](https://haltec.bitrix24.ru/~eluYV). (дата обращения: 08.04.2022)
3. **Киселев, Е.С., Ковальников, В.Н.** Механическая обработка заготовок в условиях критического тепломассопереноса // Избранные труды Российской школы по проблемам науки и технологий. – М.: РАН, 2008. – 250 с.
4. **Киселев, Е.С.** Современные ультразвуковые размерные технологии механической обработки заготовок из труднообрабатываемых и композиционных материалов // Научные технологии в машиностроении. – 2020. – №9 (111). – С. 33-39.
5. **Марков, А.И.** Ультразвуковая обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1980. – 237 с.

6. **Нерубай, М.С., Штриков, Б.Л., Калашников, В.В.** Ультразвуковая механическая обработка и сборка. – Самара: Кн. Изд-во, 1995. – 190 с.
7. **ULTRASONIC 20 linear** – Станки ULTRASONIC DMG MORI [Электронный ресурс] // URL: <https://ru.dmgmori.com/products/machines/ultrasonic/ultrasonic-linear/ultrasonic-20-linear> (дата обращения: 26.02.2022)
8. **Серия ULTRASONIC** [Электронный ресурс] // URL: [http://sistem.ru/netcat\\_files/multifile/2295/pugru13\\_ultrasonic\\_pdf\\_data.pdf](http://sistem.ru/netcat_files/multifile/2295/pugru13_ultrasonic_pdf_data.pdf) (дата обращения: 27.02.2022).
9. **Киселев, Е.С., Благовский, О.В.** Управление формированием остаточных напряжений при изготовлении ответственных деталей: монография. – Санкт-Петербург: Лань, 2020. – 140 с.

### REFERENCES

1. Khramov, A., Semdyankin, I., Kiselev, E. Application of the Modern Stationary Workholding Systems for Increase Capacity and Quality of Non-Rigid Aircraft Parts/ Matec web of Conferences 346, 03076 (2021) ICMTMTE 2021.
2. Available at: <https://haltec.bitrix24.ru/~cluYV>. (Accessed 4 april 2022)

3. Kiselev E.S., Kovalnogov V.N. Machining of work-pieces in conditions of critical heat and mass transfer. Moscow: Russian Academy of Sciences Publ., 2008, 250 p.
4. Kiselev E.S. Modern ultrasonic dimensional technologies for machining workpieces from difficult-to-machine and composite materials. / Science intensive technologies in mechanical engineering, 2020, no. 9 (111), pp. 33-39.
5. Markov A.I. Ultrasonic processing of materials. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1980. 237 p.
6. Nerubai M. S., Shtrikov B. L., Kalashnikov V. V., The ultrasonic machining and assembly. Samara Book Publ., Samara, 1995, 190 p.
7. ULTRASONIC 20 linear- ULTRASONIC DMG MORI machines, available at: [http://sistem.ru/netcat\\_files/multifile/2295/pugru13\\_ultrasonic\\_pdf\\_data.pdf](http://sistem.ru/netcat_files/multifile/2295/pugru13_ultrasonic_pdf_data.pdf) (Accessed 26 february 2022).
8. ULTRASONIC Series, available at: [http://sistem.ru/netcat\\_files/multifile/2295/pugru13\\_ultrasonic\\_pdf\\_data.pdf](http://sistem.ru/netcat_files/multifile/2295/pugru13_ultrasonic_pdf_data.pdf) (Accessed 27 february 2022).
9. Kiselev, E.S., Blagovsky, O.V. Controlling the formation of residual stresses in the manufacture of critical parts. Monography. St. Petersburg: Lan, 2020, 140 p. (in Russian).

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 17.05.2022; одобрена после рецензирования 10.06.2022; принята к публикации 17.06.2022.

The article was submitted 17.05.2022; approved after reviewing 10.06.2022; assepted for publication 17.06.2022.

