

**О.С. ЧИБУХЧЯН, А.Б. БАЛАСАНЯН, А.Л. АРШАКЯН,
Б.А. БАЛАСАНЯН**

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН
С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ДВУСТОРОННЕГО
УЛЬТРАЗВУКОВОГО УПРОЧНЕНИЯ**

Экспериментальными исследованиями установлены упрощенные квадратические математические модели зависимостей микротвердости упрочненных слоев и глубины их проникания от технологических параметров процесса ультразвукового выглаживания. Показано, что, независимо от вида полученных графических зависимостей исследуемых параметров от технологических режимов процесса выглаживания, во всех случаях и для всех обрабатываемых материалов они получаются при наибольших статическом давлении и амплитуде ультразвуковых колебаний индентора и наименьшей подаче процесса выглаживания. Установлено, что применение технологии двустороннего ультразвукового упрочнения листовых заготовок позволяет до 20...30% улучшить весовые характеристики изготовленных тонкостенных деталей машин.

Ключевые слова: ультразвук, выглаживание, прочность, детали машин, двустороннее упрочнение, технология.

Введение. Одним из эффективных путей повышения весовой эффективности летательных аппаратов различного назначения на сегодняшний день является их применение в различных конструкциях материалов пониженной плотности, таких как алюминиевые, магниевые и титановые сплавы с высокими показателями прочности, долговечности и технологии изготовления [1-5]. С другой стороны, решение этого вопроса возможно путем улучшения механических прочностных характеристик материалов тонкостенных деталей машин с применением различных методов упрочнения, таких как термическая обработка, легирование, нанесение на поверхность деталей машин износостойких покрытий и их упрочнение различными методами поверхностно-пластического деформирования (ППД) [6,7], среди которых особое место занимают методы ППД с применением ультразвуковых колебаний (УЗК) [8,9].

В настоящее время исследования в области ультразвукового ППД деталей машин проводятся с целью повышения их эксплуатационных характеристик и осуществляются ультразвуковым упрочнением их рабочих поверхностей с одной стороны, при котором, согласно известным результатам Алехина В.П. [10], на глубине 25...40 мкм создается наноструктура, которая способствует значительному повышению износостойкости рабочих поверхностей таких

деталей. Таким образом, если деталь тонкостенная, то ее двустороннее ультразвуковое упрочнение может способствовать еще большему увеличению ее механических характеристик. До настоящего времени такие исследования не проводились, что и обуславливает актуальность темы исследования.

Цель и задачи работы. Целью работы является повышение физико-механических характеристик тонкостенных деталей с применением технологии двустороннего ультразвукового выглаживания их рабочих поверхностей.

Методика исследования. Экспериментальные исследования проводились в два этапа [11]. На первом этапе проведены исследования ультразвукового одностороннего упрочнения кольцевых образцов размерами наружного диаметра $\varnothing 40$ мм, внутреннего диаметра $\varnothing 26$ мм и шириной 20 мм из нержавеющей стали марки X18H9T, дюралюминия марки DT16 и титанового сплава марки В1-0. Кольцевые образцы посредством промежуточных втулок были собраны и закреплены на специальной оправке (рис.1), которая посредством ее центровочных отверстий была установлена в центрах прецизионного токарно-винторезного станка марки 16Б05А. Перед проведением экспериментов для устранения радиального биения образцов они были подвергнуты токарной чистовой обработке.

На втором этапе проведены исследования ультразвукового двустороннего упрочнения как многослойных плоских образцов, полученных намоткой фольги толщиной 20 мкм в 21 слой на прямоугольную подложку (рис. 2б), так и однослойных плоских образцов толщиной, мм: 0,4; 0,6; 0,8; 1; 1,2 и 1,4 с оптимальными технологическими режимами, полученными на первом этапе исследований. После ультразвуковой обработки из них электроэрозией были вырезаны образцы согласно ГОСТу 1497-84 для последующего их испытания на растяжение (рис. 1). Образцы изготовлены из алюминиевого сплава марки 8011, нержавеющей стали марки X18H9T и титанового сплава марки В1-0.

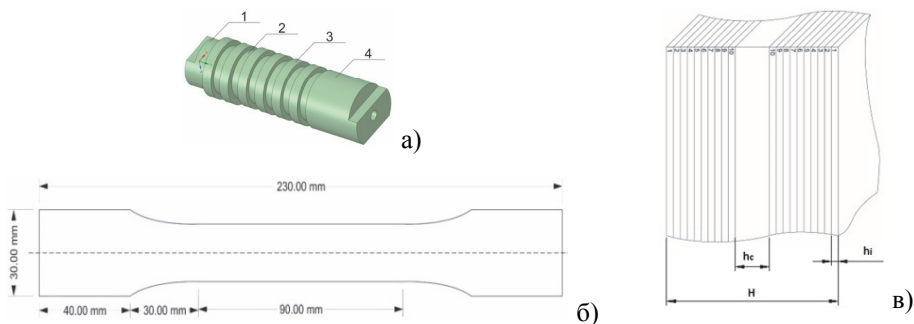


Рис.1. Экспериментальные образцы: а - оправка в сборе с кольцевыми образцами, б - образцы для испытания на растяжение, в - слоистые образцы, $h_i = 20$ мкм

Для проведения экспериментальных исследований разработан ультразвуковой магнитоотрицательный выглаживатель с алмазным индентором и встроенными динамометрами, который имеет возможность задания величины статической силы процесса выглаживания посредством цифрового индикатора. Преобразователь УЗК изготовлен разработанным нами новым способом изготовления компактных малогабаритных трехстержневых магнитоотрицательных колебаний (Патент РФ 3265 А2).

Исследования проводились новым методом математического планирования экспериментов, разработанным в НПУА, а машинная обработка результатов экспериментов - посредством разработанного в НПУА виртуального прибора для моделирования трехфакторных технологических процессов в программной среде LabVIEW, позволяющего воспроизвести результаты экспериментов с точностью машинной погрешности и получить математические модели исследуемых параметров в кодовых и натуральных значениях входных параметров в виде следующих выражений:

где $Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2 + B_{33}X_3^2 + B_{112}X_1^2X_2 + B_{122}X_1X_2^2$,

$$B_0 = b_0 - b_{12} - b_{34} - b_{56}, \quad B_1 = 2(b_1 - b_{134}), \quad B_2 = 2(b_3 - b_{123}), \quad B_3 = 2b_{13};$$

$$B_{11} = 2b_{12}, \quad B_{22} = 2b_{34}, \quad B_{33} = 2b_{1234}, \quad B_{112} = 4b_{123}, \quad B_{122} = 4b_{134};$$

$$Y = A_0 + A_1x_1 + A_2x_2 + A_3x_3 + A_{11}x_1^2 + A_{22}x_2^2 + A_{33}x_3^2 + A_{112}x_1^2x_2 + A_{122}x_1x_2^2;$$

$$A_0 = B_0 + B_1c_1 + B_2c_2 + B_3c_3 + B_{11}c_1^2 + B_{22}c_2^2 + B_{33}c_3^2 + B_{112}c_1^2c_2 + B_{122}c_1c_2^2,$$

где $A_1 = B_1 + 2B_{11} + 2B_{112}c_2 + B_{122}c_2^2$, $A_2 = B_2 + 2B_{22} + 2B_{122}c_1 + B_{112}c_1^2$, $A_3 = (B_3 + 2B_{33})k_3$,

$$A_{11} = B_{11} + B_{112}c_2)k_1^2, \quad A_{12} = 2(B_{112} + B_{122})k_1k_2, \quad A_{22} = (B_{22} + B_{122}c_1)k_2^2,$$

$$A_{33} = B_{33}k_3^2, \quad A_{112} = B_{112}k_1^2k_2, \quad A_{122} = B_{122}k_1k_2^2.$$

На втором этапе проведены исследования ультразвукового двустороннего упрочнения как многослойных плоских образцов, полученных намоткой фольги толщиной 20 мкм в 21 слой на прямоугольную подложку, так и однослойных плоских образцов толщиной, мм: 0,4; 0,6; 0,8; 1; 1,2 и 1,4 с оптимальными технологическими режимами, полученными на первом этапе исследований. После ультразвуковой обработки из них электроэрозивной обработкой были вырезаны образцы с размерами для последующего их испытания на растяжение согласно ГОСТ 1497-84. Образцы изготовлены из алюминиевого сплава марки 8011, нержавеющей стали марки X18H9T и титанового сплава марки В1-0.

Ультразвуковое выглаживание осуществлено на ультразвуковом прошивочном станке марки 4772А, электропитание акустической системы (мощностью 2,5 кВт) было подсоединено к выходу ультразвукового генератора УЗГ-10 мощностью 10 кВт. Выбор ультразвукового прошивочного станка

марки 4772А обусловлен тем, что он имеет возможность установления необходимого статического давления путем уравнивания пиноли его акустической системы, а его стол имеет возможность продольного перемещения и поворота вокруг своей вертикальной оси, что достаточно для проведения намеченных экспериментов.

В качестве выходных приняты параметры, определяемые разрывной машиной: модуль упругости, пределы текучести и прочности, а также относительное удлинение образцов до их разрыва в соответствии с ГОСТ 7855-84. Эти испытания для образцов из нержавеющей стали марки X18H9T и титанового сплава марки В1-0 проведены разрывной машиной марки TIRA Test 2300, а для образцов из алюминиевого сплава марки 8011- разрывной машиной марки HOUNSFIELD HKS5 с компьютерным интерфейсом. Для исследования микроструктуры образцов до и после упрочнения и их разрыва использован электронный микроскоп АХЮ со специальным оптическим окуляром с 1000 - кратным увеличением и компьютерным интерфейсом с программным пакетом AxioVision LE.

На основе экспериментальных исследований, проведенных на первом этапе, получены математические модели зависимостей глубины и микротвердостей упрочненного слоя в кодовых и натуральных значениях от технологических режимов в виде следующих математических моделей:

- для титанового сплава марки ВТ1-0:

$$h = -573,59 + 11318,056S + 5,884P_{st} - 1,219A + 245625S^2 - 77,889SP_{st} - 0,013P_{st}^2 + 0,137A^2 + 200S^2P_{st} - 116SP_{st}^2, \quad (1)$$

$$H_{100} = -12903,014 + 352925S + 179,554P_{st} + 20,094A - 1620416,333S^2 - 3041,667SP_{st} - 0,056P_{st}^2 + 2,391A^2 + 13583,335S^2P_{st} + 0,213SP_{st}^2; \quad (2)$$

- для дюралюминия марки D16:

$$h = -366,625 + 6325S + 7,608P_{st} + 2,187A - 21250S^2 - 107SP_{st} - 0,013P_{st}^2 - 0,023A^2 + 350S^2P_{st} + 0,12SP_{st}^2 \quad (3)$$

$$H_{100} = 4085,038 + 19647,917S + 29,736P_{st} + 56,422A - 74479,167S^2 - 346,833SP_{st} - 0,051P_{st}^2 - 1,537A^2 + 1008,335S^2P_{st} + 0,5SP_{st}^2; \quad (4)$$

- для нержавеющей стали марки X18H9T:

$$h = 60,455 + 169236S + 0,521P_{st} + 1,641A + 947917S^2 - 8,944SP_{st} - 0,001P_{st}^2 - 0,021A^2 + 58,335S^2P_{st} - 0,016SP_{st}^2, \quad (5)$$

$$H_{100} = 8589,049 - 28176,389S + 0,742P_{st} + 58,687A + 99375S^2 + 192,222SP_{st} - 0,021P_{st}^2 - 0,16A^2 - 1000S^2P_{st} + 0,111SP_{st}^2. \quad (6)$$

Анализ полученных математических моделей (1)-(6) и графических зависимостей выходных параметров от изменения всех входных параметров

показал следующие обобщенные результаты: независимо от вида полученных графических зависимостей исследуемых параметров от технологических режимов процесса выглаживания, во всех случаях и для всех обрабатываемых материалов они получаются при наибольших статическом давлении и амплитуде УЗК индентора и наименьшей подаче процесса выглаживания. При этом наибольшая глубина упрочненного слоя для титанового сплава марки ВТ1-0 и нержавеющей стали марки Х18Н9Т доходит до $h=194$ мкм, для дюралюминия марки Д16 - $h=168,5$ мкм. Наибольшая микротвердость упрочненного слоя для титанового сплава марки ВТ1-0 доходит до $H_{100}=8781,2$ МПа, для дюралюминия марки Д16 до $H_{100}=6920,1$ МПа, для нержавеющей стали марки Х18Н9Т- $H_{100}=9431,5$ МПа.

Измерения показывают, что до ППД с УЗК размеры зерен находятся в пределах 2...5 мкм для сплава из алюминия марки 8011 (рис.2а), а после двустороннего ППД с УЗК - уменьшаются до 40...80 нм (рис.2б) [11], при этом структура с минимальными размерами образуется в передней части второго слоя. Это доказывает известные результаты о том, что наноструктуры образуются на глубине 20...30 мкм.

Как видно из рис.3, предел текучести в зависимости от глубины упрочненного слоя вначале уменьшается до срединного сечения, после чего увеличивается до своей наибольшей величины. При этом наименьшая величина оказывается больше предела текучести исходного материала. Это означает, что глубина упрочненного слоя больше 0,22 мм.

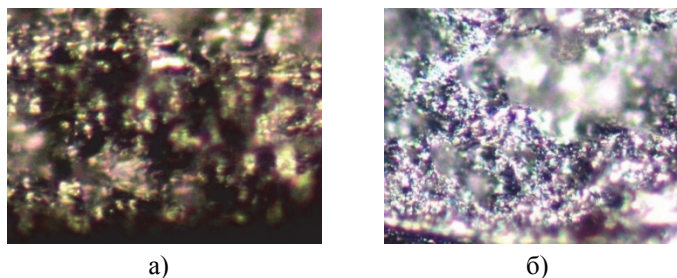


Рис. 2. Микроструктура поверхностного слоя среза после испытания на машине разрыва для алюминиевого сплава марки 8011: а- исходный материал, 200 \times , б - упрочненный материал, 1000 \times

На основе проведенных исследований установлены экспериментальные зависимости изменения пределов текучести и относительных удлинений слоев после их разрыва от глубины упрочненного слоя, приведенные на рис.4. Помимо этого, из рис. 3 видно, что чем больше предел текучести упрочненного слоя, тем больше его относительное удлинение, т.е. пластичность тонкостенной де-

тали. Повышение относительного удлинения слоев до их разрыва превышает установленные ГОСТом 618-2014 требования в два и более раза. Это возможно только в том случае, когда, согласно результатам известных исследований, в этих слоях образуются наноструктурные образования.

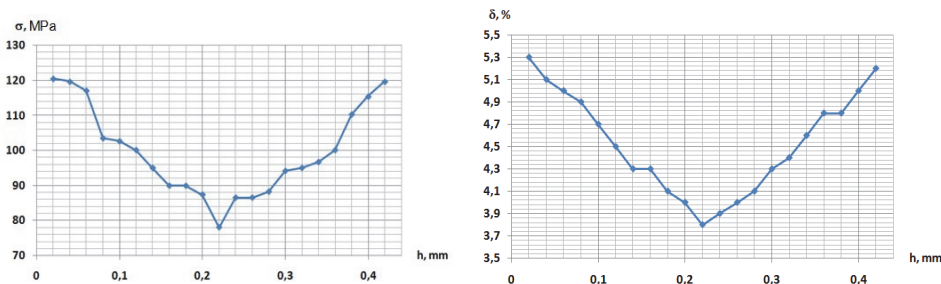


Рис. 3. Зависимости изменения пределов текучести и относительных удлинений слоев после их разрыва от глубины упрочненного слоя

С учетом приведенных на рис. 3 результатов экспериментальных исследований проведенные расчеты согласно выражению (6) показали, что двусторонняя ультразвуковая обработка тонкостенной пластины позволяет до 20,6% увеличить ее осевую жесткость с одновременным увеличением ее пластичности, что дает возможность значительно улучшить условия штамповки сложных деталей машин из таких пластин. Таким образом, экспериментальными исследованиями установлено, что предел текучести тонкостенного многослойного образца из фольги марки 8011, обработанной двусторонним ультразвуковым выглаживанием, в зависимости от глубины упрочненного слоя, вначале уменьшается до срединного сечения, затем увеличивается до своей наибольшей величины. По аналогичной зависимости изменяется относительное удлинение, т.е. пластичность тонкостенной детали, что является признаком образования наноструктурных образований в исследуемых слоях (рис.4).

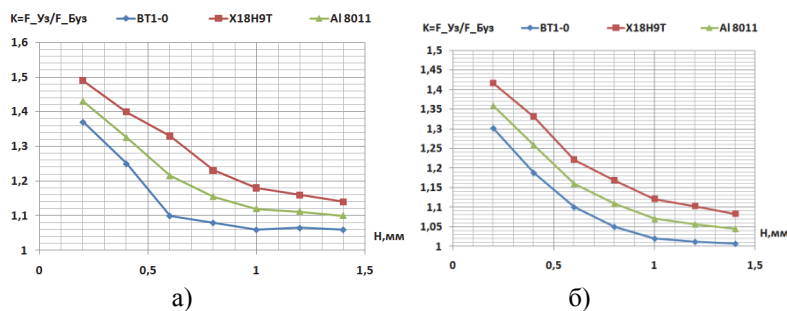


Рис. 4. Зависимости изменения пределов текучести и относительных удлинений слоев после их разрыва от глубины упрочненного слоя: а - экспериментальные результаты, б - расчетные результаты

Установлено, что двусторонняя ультразвуковая обработка многослойной пластины из алюминиевой фольги марки 8011 общей толщиной 0,42 мм позволяет до 20,6% увеличить ее осевую жесткость с одновременным увеличением ее пластичности, что дает возможность значительно улучшить условия изготовления сложных деталей машин из таких тонкостенных пластин методами штамповки.

На втором этапе проведения экспериментальных исследований получены графические зависимости коэффициентов K повышения механических характеристик пластин, обработанных двусторонним ультразвуковым выглаживанием, от их толщины в виде соотношения силы разрыва однослойных пластин после ультразвуковой двусторонней обработки к силе разрыва однослойных пластин в исходном состоянии: $K = F_{УЗ} / F_{БуЗ}$ (рис.4).

Это позволило сравнить толщины как необработанных тонкостенных деталей машин при той же силе растяжения, так и упрочненных с УЗК. В этом случае $F_{БуЗ} = F_{УЗ}$, откуда следует

$$45189 \cdot B1 + 355 \cdot 94 = 47309 \cdot B2 + 3698 \cdot 1 \Rightarrow 47309 \cdot B2 = 45189 \cdot B1 - 3342 \cdot 16 \Rightarrow \\ \Rightarrow B2 = 0.955188 \cdot B1 - 0.07065$$

Таким образом, получена зависимость толщины тонкостенной детали, обработанной с УЗК, от толщины необработанной такой же детали из условия равной прочности.

Выводы. Экспериментальными исследованиями установлены упрощенные квадратические математические модели зависимостей микротвердости упрочненных слоев и глубины их проникания от технологических параметров процесса ультразвукового выглаживания. Анализ полученных математических моделей и их графических зависимостей выходных параметров от изменения всех входных параметров показал, что, независимо от вида полученных графических зависимостей исследуемых параметров от технологических режимов процесса выглаживания, во всех случаях и для всех обрабатываемых материалов они получаются при наибольших статическом давлении и амплитуде УЗК индентора и наименьшей подаче процесса выглаживания.

Установлено, что применение технологии двустороннего ультразвукового упрочнения листовых заготовок для изготовления из них методами обработки материалов давлением позволяет до 20...30% улучшить весовые характеристики изготовленных тонкостенных деталей машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Каблов Е.Н.** Алюминиевые сплавы в авиакосмической технике / Под общ. ред. Е.Н. Каблова. - М.: Наука, 2001.- 192 с.
2. **Антипов В.В.** Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии.- 2012.- NS.- С.157–167.
3. Конструкция и прочность летательных аппаратов гражданской авиации: Учебник для вузов гражданской авиации/ **М.С. Воскобойник, П.Ф. Максютинский, К.Д. Миртов** и др. – М.: Машиностроение, 1991. – 448 с.
4. **Вялов А.В.** Основы технологии производства самолетов: Учеб. пос.- 2-е изд., доп.- Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2013.-145 с.
5. **Антипов В.В.** Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техник // Авиационные материалы и технологии.-2007.-N S.-С.186-194.
6. **Зайдес С.А., Забродин В.А., Мураткин В.Г.** Поверхностное пластическое деформирование.-Иркутск: Изд-во Иркутского государственного технического университета, 2002. - 304 с.
7. **Муханов И.И., Голубев Ю.М.** Упрочнение стальных деталей шариком, вибрирующим с ультразвуковой частотой //Вестник машиностроения.– 1966. – №11. – С. 52 – 53.
8. **Лебедев В.А.** Технологическое обеспечение качества поверхности деталей при вибрационной ударно-импульсной обработке: Дис. к.т.н.: 05.02.08. -Ростов-на-Дону, 1984.
9. **Марков А.И., Устинов И.Д.** Ультразвуковое алмазное выглаживание деталей и режущего инструмента.-М.: Машиностроение, 1979.- 54 с.
10. **Алехин В.П.** Получение нано- и субмикроструктур в сталях с использованием ультразвуковой технологии. //Известия высших учебных заведений.- Черная металлургия.- М.: МГИУ, 2012.- N 8.- С. 68-70.
11. **Чибухчян О.С.** Повышение прочности тонкостенных деталей летательных аппаратов применением ультразвуковой технологии: Автореферат дис. ... к.т.н.: 05.02.03.- Ереван, 2020.- 22 с.

**Հ.Ս. ՉԻԲՈՒԽՉՅԱՆ, Ա.Բ. ԲԱԼԱՍԱՆՅԱՆ, Ա.Լ. ԱՐՇԱԿՅԱՆ,
Բ.Ա. ԲԱԼԱՍԱՆՅԱՆ**

**ԲԱՐԱԿԱՊԱՏ ՄԵՔԵՆԱՄԱՍԵՐԻ ԱՄՐՈՒԹՅԱՆ ԲԱՐՁՐԱՑՈՒՄԸ
ԵՐԿԿՈՂՄԱՆԻ ՈՒՆՏՐԱՁԱՅՆԱՅԻՆ ԱՄՐԱՑՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՅԻ
ԿԻՐԱՌՄԱՄԲ**

Փորձարարական հետազոտություններով սահմանված են ամրացված շերտերի միկրոկարծրացման և դրանց թափանցման խորության պարզեցված քառակուսի մաթեմատիկական մոդելների կախվածությունները ուլտրաձայնային հարթեցման գործընթացի տեխնոլոգիական պարամետրերից: Ցուցադրված է, որ անկախ հետազոտվող պարամետրերի ստացված գրաֆիկական կախվածությունների տեսակից, հարթեցման գործընթացի տեխնոլոգիական ռեժիմներից, բոլոր դեպքերում և բոլոր մշակվող նյութերի համար դրանք ստացվում են ինդենտորի մեծագույն ստատիկ ուժի, ամպլիտուդի և հարթեցման գործընթացի ամենափոքր մատուցման դեպքում: Հաստատվել է, որ թերթային նախապատրաստվածքների երկկողմ ուլտրաձայնային հարթեցման տեխնոլոգիայի կիրառումը թույլ է տալիս մինչև 20...30% բարելավել պատրաստված բարակապատ մեքենաների քաշային բնութագրերը:

Առանցքային բառեր. ուլտրաձայն, հարթեցում, ամրություն, մեքենամասեր, երկկողմանի, ամրացում, տեխնոլոգիա:

**H.S. CHIBUKHCHYAN, A.B. BALASANYAN, A.L. ARSHAKYAN,
B.A. BALASANYAN**

**IMPROVING THE STRENGTH OF THIN-WALLED MACHINE PARTS
USING THE TECHNOLOGY OF TWO-WAY ULTRASONIC
HARDENING**

Experimental studies have established simplified quadratic mathematical models of dependences of microhardness of the hardened layers and the depth of their penetration on the technological parameters of the ultrasonic smoothing process. It is shown that, regardless of the type of the obtained graphical dependences of the studied parameters on the technological modes of the smoothing process, in all cases and for all the processed materials, they are obtained at the highest static pressure and the amplitude of the indenter and the lowest feed of the smoothing process. It is established that the use of the technology of bilateral ultrasonic hardening of sheet blanks allows to improve the weight characteristics of the manufactured thin-walled machine parts by up to 20 ... 30%.

Keywords: ultrasound, smoothing, strength, machine parts, double-sided hardening, technology.