

Машиностроение и машиноведение

УДК 621.91

DOI: 10.30987/article_5b28d1921f23d8.29887997

Р.Н. Фоменко, М.В. Тимофеев

**ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ
ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ
С ЦЕЛЮ СНИЖЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ**

Предложен подход к решению проблемы коробления корпусных деталей из алюминиевых сплавов путём назначения оптимальных режимов резания при точении. Разработано уравнение обрабатываемости заготовок из сплава Д16Т. Приведены экспериментальные данные по влиянию режимных параметров обработки на силы резания, шеро-

ховатость обработанной поверхности и наклеп. Приведены полученные расчетным путем графики распределения тангенциальных остаточных напряжений после точения.

Ключевые слова: коробление, алюминиевые сплавы, остаточные напряжения, режимные параметры обработки.

R.N. Fomenko, M.V. Timofeev

TECHNOLOGICAL CONDITIONS OPTIMIZATION FOR ALUMINUM ALLOY THIN-WALLED PARTS MACHINING TO DECREASE RESIDUAL DEFORMATIONS

Warping of thin-walled parts made of aluminum alloys complicates substantially an engineering process, increases a cost price and labour-intensity in manufacturing products, and in some cases it results in waste. In the paper there is offered an approach to the solution of the warping problem of aluminum alloy body parts through the introduction of optimum cutting modes at turning. Under optimum machining modes one implies those modes corresponding to the maximum cutter durability. There is developed an equation of machinability of blanks made of alloy D16T. The experimental data on the impact of machining mode parameters upon cutting forces, roughness of the surface machined and cold working are shown. Blank ma-

chining was carried out on a universal screw-cutting lathe NH 22. Cutting force components P_z , P_y and P_x were recorded by universal dynamometer UDM-600, a cutting temperature was defined by a method of a natural blank-cutter thermocouple. Surface roughness was measured by device TR-200, surface microhardness was defined by automatic hardness gauge DuraScan 10. There are shown diagrams of tangential residual stress distribution after turning obtained in a computation way.

Key words: warping, aluminum alloys, residual stresses, machining mode parameters.

Введение

При изготовлении маложёстких тонкостенных деталей из алюминиевых сплавов в материале детали формируются технологические остаточные напряжения, являющиеся следствием операций заготовительного производства, механической и термической обработки. В процессе удаления части припуска при механической обработке нарушается равновесное напряжённо-деформированное состояние, что приводит к короблению – нежелательному изменению размеров, формы и расположения поверхностей детали после механической обработки резанием и снятия детали со станочного приспособления.

В силу процессов релаксации у многих деталей из алюминиевых сплавов технологические остаточные напряжения, формируемые на стадии изготовления, не

остаются постоянными при хранении, сборке и эксплуатации. Данное явление приводит к целому ряду проблем при сборке изделий, а также к несоответствию эксплуатационных характеристик изделий при их испытаниях. Помимо этого, коробление тонкостенных деталей, изготовленных из алюминиевых сплавов, существенно усложняет технологический процесс, увеличивает себестоимость и трудоёмкость изготовления изделий, а в отдельных случаях ведёт к неисправимому браку. Таким образом, изучение зависимости деформаций тонкостенных деталей, изготовленных из алюминиевых сплавов, от условий и режимных параметров механической и термической обработки на данный момент является актуальной производственной задачей.

Постановка проблемы

На одном из машиностроительных предприятий специалисты по производству деталей столкнулись с проблемой изготовления тонкостенных корпусных деталей из алюминиевых сплавов. После механической обработки деталей проводилась контрольная операция, по результатам которой большинство деталей признавались годными. Однако перед сборкой узла контрольная проверка показывала отклонения геометрии большинства деталей сверх допуска, что свидетельствует о короблении

деталей ввиду релаксации и перераспределения остаточных напряжений.

В проведённом исследовании сделана попытка решить указанную проблему назначением технологических условий обработки тонкостенных корпусных деталей, обеспечивающих, с одной стороны, их минимальное коробление во время и после механической обработки, с другой – заданную шероховатость поверхности. Примеры корпусных деталей показаны на рис. 1.



Рис. 1. Тонкостенные корпусные детали из алюминиевых сплавов

Материал детали - деформируемый алюминиевый сплав Д16Т. Существующий технологический процесс изготовления детали в качестве основного формообразующего метода использует точение резцами, оснащёнными твердосплавными сменными пластинами IC907. Режим резания на чистовой операции: глубина резания $t = 0,5$ мм, подача $S = 0,1$ мм/об, скорость резания $v = 4,4$ м/с.

Основная цель исследования - назначить научно обоснованные технологические условия механической обработки детали, способствующие снижению уровня и глубины залегания остаточных напряжений, приводящих к короблению детали.

Хорошо известно, что результирующие технологические остаточные напряжения можно представить как суперпозицию остаточных напряжений, формирующихся в детали по нескольким различным механизмам. Если исключить из рассмотрения стадию заготовительного производства, такими механизмами будут являться: неравномерные пластические деформации

от силового фактора; термопластические деформации от температурного фактора; структурно-фазовые превращения в материале, индуцируемые высокими температурами в зоне обработки (рис. 2).

Известно, что для конкретной пары обрабатываемый - инструментальный материал при заданных технологических условиях существуют оптимальные режимы резания, при которых обеспечивается минимальный износ инструмента, а также наилучшие показатели параметров качества поверхностного слоя: минимальная шероховатость поверхности, минимальные уровень и глубина залегания остаточных напряжений и наклепа, благоприятные эксплуатационные свойства детали после обработки (максимальный предел выносливости и контактная жесткость). При этом оптимальные режимы резания предпочтительно использовать на чистовом этапе обработки ответственных деталей, а также в случаях, когда требуется обеспечить высокую стойкость режущего инструмента [1].

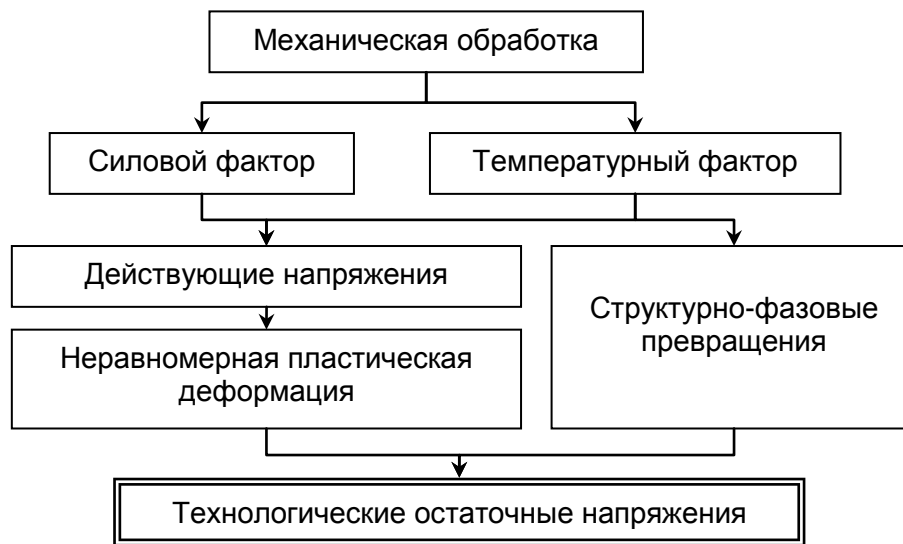


Рис. 2. Схема формирования остаточных напряжений в поверхностном слое деталей при механической обработке

Согласно исследованиям А.Д. Макарова [4], оптимальным режимам резания соответствует оптимальная температура резания T_o , которая является константой для каждой рассматриваемой пары инструментальный - обрабатываемый материал. Значение T_o достигается при определенной скорости резания v_o . Выполняя обработку заготовки острым инструментом на оптимальных режимах резания, можно максимально снизить влияние механической обработки резанием на технологические остаточные напряжения, формируемые в материале детали. Таким образом, задача получения поверхности с заданной шероховатостью и минимальной глубиной залегания остаточных напряжений заключается в нахождении оптимальной скорости резания v_o , которая соответствует оптимальной температуре резания T_o .

Существует ряд известных методик назначения оптимальных режимов обработки [2; 3], практическое использование которых сопряжено с большим объемом экспериментальных исследований по обработке резанием. Вместе с тем можно добиться существенного снижения трудоёмкости путём разбиения алгоритма назначения оптимальных режимов на 2 уровня.

На первом уровне для заданного материала заготовки разрабатывается базовое уравнение обрабатываемости вида

$$v_o = f(a, a_1, c\rho, t, S, Pz_{\min}^*, T_o),$$

где a - температуропроводность обрабатываемого материала, m^2/c ; a_1 - толщина среза, m ; $c\rho$ - удельная объемная теплоемкость обрабатываемого материала, $Дж/(m^3 \cdot c \cdot град)$; t, S - глубина резания и подача соответственно, m ; v - скорость резания, $m/мин$; Pz_{\min}^* - минимальная стабилизированная сила резания, H , которая устанавливается после достижения оптимальной температуры T_o в зоне резания.

На втором уровне из базового уравнения применительно к семейству режущих инструментов одного типа получают частные уравнения обрабатываемости введением масштабного коэффициента k_n в зависимость силы резания: $Pz_{\min} = k_n Pz_{\min}^*$. Коэффициент k_n позволяет учесть различие в составе инструментальных материалов, наличие стружколомающих поверхностей, износостойких покрытий с низкими коэффициентами трения, модифицированной геометрии режущего клина.

Авторами получены следующие зависимости критериев процесса резания и силы резания при точении заготовок из материала Д16Т резцами с пластинами ВК8:

$$B = 14,38A^{2,15}, \quad (1)$$

$$Pz_{\min} = 682S^{0,71}v^{0,94}, \quad (2)$$

где $A = S \cdot t \cdot c\rho \cdot T / Pz_{\min}$ - энергетический критерий, характеризующий собой отношение количества тепла, уходящего при резании в стружку, к общему выделившемуся

муся при резании количеству тепла; $B = v \cdot a_1 / a$ - критерий процесса резания, характеризующий степень влияния режимных условий процесса резания по сравнению с влиянием теплофизических свойств обрабатываемого материала; v - скорость резания, м/мин; T - температура в зоне резания, °С.

С использованием графоаналитического метода [3] из уравнений (1) и (2) получено базовое уравнение обрабатываемости для расчета оптимальной скорости резания при точении для сочетания материа-

лов инструмента и заготовки ВК8-Д16Т следующего вида:

$$v_o = \frac{3,86a}{a_1} \left(\frac{t \cdot S \cdot c\rho}{S^{0,71} t^{0,94}} \right)^{2,15}.$$

Для учета особенностей используемой в технологическом процессе твердосплавной пластины IC907 SNMG120408-TF на втором этапе необходимо получить экспериментальную оценку масштабного коэффициента k_n в зависимости силы резания и уточненное уравнение (2) в следующем виде:

$$Pz_{\min} = k_n \cdot 682 S^{0,71} t^{0,94}. \quad (3)$$

Методология исследований

Количественная оценка масштабного коэффициента k_n проводилась на основе обработки экспериментальных данных по

силам резания при токарной обработке тонкостенных модельных заготовок из сплава Д16Т (рис. 3).



Рис. 3. Внешний вид кольцевых заготовок

Обработка проводилась на универсальном токарно-винторезном станке НН 22. Компоненты силы резания Pz , $Pу$ и Px регистрировались автоматизированной системой, включающей универсальный динамометр УДМ-600, тензометрическую станцию 8АНЧ-23 и аналого-цифровой преобразователь ISO4USB со штатным программным обеспечением. В процессе обработки осуществлялся пороговый контроль температуры резания по данным измерений термоЭДС естественной термопары заготовка-резец. На рис. 4 представлен внешний вид экспериментальной установки с приспособлением для закрепления кольцевых заготовок.

Экспериментальные исследования проводились в 3 этапа.

На *первом этапе* выполнялась токарная обработка кольцевых заготовок на заводских режимах резания инструментами из твердого сплава ВК8, IC907 и IC20 (без покрытия) с целью оценки масштабного коэффициента k_n для уравнения (3). Режимные параметры обработки и результаты экспериментов приведены в табл. 1.

Результаты экспериментов по обработке заготовок резанием показали, что тангенциальная составляющая силы резания Pz при обработке материала инструментом из сплава IC907 снижается на 26% по сравнению с инструментальным сплавом ВК8 при прочих равных условиях, что

дает возможность использовать поправочный коэффициент $k_n = 0,74$ и получить частное уравнение обрабатываемости для сочетания IC907–Д16Т следующего вида:

$$v_o = \frac{3,86a}{a_1} \left(\frac{t \cdot S \cdot c \rho}{0,74 S^{0,71} t^{0,94}} \right)^{2,15} \quad (4)$$

Составляющие силы резания при обработке инструментом из сплава IC907 ниже сил резания на 8-10% по сравнению с обработкой сплавом IC20 (без покрытия) при прочих равных условиях (табл. 1).



Рис. 4. Экспериментальная установка на базе токарного станка NH 22

Таблица 1

Результаты экспериментов

№	Параметр	Марка инструментального материала				
		IC20 SNMG120408- GN	IC907 SNMG120408-TF		BK8	
1	Геометрия инструмента	$\alpha = 5^\circ, \gamma = 10^\circ, \varphi = \varphi_1 = 45^\circ, r = 0,8 \text{ мм}$			$\alpha = 10^\circ, \gamma = 10^\circ, \varphi = 45^\circ, \varphi_1 = 20^\circ, r = 0,8 \text{ мм}$	
2	Скорость резания v , м/с	4,4	4,4	5,6	5,6	4,4
3	Глубина резания t , мм	0,5				
4	Подача S , мм/об	0,1				
5	Сила резания P_z , Н	58	52	46	65	71
6	Сила резания P_y , Н	26	21	14	–	–
7	Сила резания P_x , Н	8	6	5	–	–

На *втором этапе* исследования одна заготовка из алюминиевого сплава была обработана инструментом из твердого сплава IC907 на скорости $v = 4,4$ м/с, применяемой в заводском технологическом

процессе, а другая заготовка – на оптимальной скорости $v_o = 5,6$ м/с, рассчитанной по уточненному уравнению (4), в котором учтено влияние твердосплавного

инструмента из сплава IC907 по сравнению с инструментом из сплава BK8.

На *третьем этапе* проводилось экспериментальное определение параметров качества поверхностного слоя деталей после обработки точением. На двух кольцевых заготовках, обработанных на оптимальной (5,6 м/с) и базовой скорости резания (4,4 м/с) твердосплавным инструментом из сплава IC907 при прочих равных

условиях, проводили измерение микротвёрдости и шероховатости обработанных поверхностей. Шероховатость поверхностей измеряли на приборе TR-200, микротвёрдость поверхности определяли на автоматическом твердомере DuraScan 10 при нагрузке на алмазный индентор Виккерса 25 г. Результаты измерений представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Результаты измерений параметра шероховатости Ra обработанной поверхности

№ измерения	Заготовки, обработанные на заводских режимах ($v = 4,4$ м/с)		Заготовки, обработанные на предлагаемых режимах ($v_o = 5,6$ м/с)	
	Ra , мкм	Среднее значение Ra , мкм	Ra , мкм	Среднее значение Ra , мкм
1	0,73	0,85	0,82	0,87
2	0,79		0,84	
3	0,73		1,16	
4	0,98		0,83	
5	1,00		0,69	

Таблица 3

Результаты измерений микротвёрдости обработанной поверхности

№ измерения	Заготовки, обработанные на заводских режимах ($v = 4,4$ м/с)		Заготовки, обработанные на предлагаемых режимах ($v_o = 5,6$ м/с)	
	Микротвёрдость HV	Среднее значение HV	Микротвёрдость HV	Среднее значение HV
1	101	107	122	125
2	112		114	
3	108		138	

Как видно из полученных данных, переход на оптимальную скорость резания не приводит к статистически значимому изменению параметра Ra обработанных поверхностей. В то же время микротвёрдость поверхности второго образца, обработанного на оптимальных режимах, увеличилась на 17%, что может быть объяснено снижением средней температуры в зоне резания.

Определение тангенциальных остаточных напряжений по величине и глубине

залегания выполнялось расчетным методом с помощью программного обеспечения, разработанного на основе математических моделей [2]. По результатам расчетов построены эпюры распределения тангенциальных остаточных напряжений в поверхностном слое (рис. 5). Анализ эпюр показывает, что обработка образца на оптимальных режимах приводит к снижению максимума остаточных напряжений на 33%.

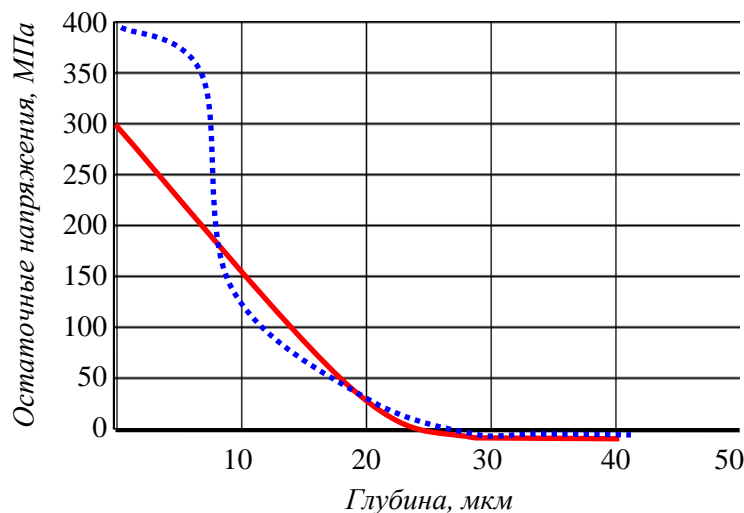


Рис. 5. Эпюры тангенциальных остаточных напряжений:

— - оптимальная скорость резания 5,6 м/с; - скорость резания 4,4 м/с

Выводы

1. Составляющая силы резания P_z при обработке заготовки инструментом из сплава IC907 снижается на 26% в сравнении с инструментальным сплавом ВК8 при прочих равных условиях.

2. Оптимальная скорость резания, определенная расчетным путем по полученному уравнению обрабатываемости, выше скорости резания, назначенной в заводском технологическом процессе, что обеспечивает повышение производительности обработки при одновременном повышении стойкости режущего инструмента.

3. Обработка заготовки на оптимальных режимах резания практически не по-

влияла на шероховатость обработанной поверхности по сравнению с обработкой на исходной скорости резания, однако привела к повышению микротвердости обработанной поверхности на 15%, что свидетельствует о снижении роли теплового фактора и росте влияния силового фактора на наклеп.

4. Расчет тангенциальных остаточных напряжений показал, что обработка на предлагаемых оптимальных режимах способствует снижению величины остаточных напряжений и, соответственно, коробления деталей после обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безъязычный, В.Ф. Влияние наноструктурированных покрытий инструмента на оптимальную скорость резания при механической обработке точением / В.Ф. Безъязычный, М.В. Тимофеев, Р.Н. Фоменко // Справочник. Инженерный журнал. - 2012. - № 8. - С. 38-43.
2. Безъязычный, В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения / В.Ф. Безъязычный. - М.: Машиностроение, 2012. - 320 с.
3. Силин, С.С. Метод подобия при резании материалов / С.С. Силин. - М.: Машиностроение, 1979. - 152 с.
4. Макаров, А.Д. Оптимизация процессов резания / А.Д. Макаров. - М.: Машиностроение, 1976. - 278 с.
5. Подзей, А.В. Технологические остаточные напряжения / А.В. Подзей. - М.: Машиностроение, 1973. - 216 с.
6. Маталин, А.А. Технология механической обработки / А.А. Маталин. - М.: Машиностроение, 1977. - 462 с.
7. Старков, В.К. Физика и оптимизация резания материалов / В.К. Старков. - М.: Машиностроение, 2009. - 640 с.
8. Абрамов, В.В. Напряжения и деформации при термической обработке стали / В.В. Абрамов. - Киев; Донецк: Вища шк., 1985. - 133 с.
9. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel / ed. G. Totten, M. Howes, T. Inoue. - Ohio: ASM International, Materials Park, 2002.

10. Mahdi, M. Applied mechanics in grinding. Part IV. The mechanism of grinding induced phase transformation / M. Mahdi, L. Zhang // International Journal of Machine Tools and Manufacture. - 1995. - № 1.
11. Mahdi, M. Applied mechanics in grinding. Part V. Thermal residual stresses / M. Mahdi, L. Zhang // International Journal of Machine Tools and Manufacture. - 1997. - № 1.
12. Mahdi, M. Applied mechanics in grinding. Part VI. Residual stresses and surface hardening by coupled thermo-plasticity and phase transformation / M. Mahdi, L. Zhang // International Journal of Machine Tools and Manufacture. - 1998. - № 1.
1. Beziyazychny, V.F. Impact of nano-structured tool coatings upon optimum cutting speed at turning / V.F. Beziyazychny, M.V. Timofeev, R.N. Fomenko // *Reference Book. Engineering Journal*. - 2012. - No.8. - pp. 38-43.
2. Beziyazychny, V.F. *Similarity Method in Engineering Technique* / V.F. Beziyazychny. - M.: Mechanical Engineering. 2012. - pp. 320.
3. Silin, S.S. *Similarity Method at Material Cutting* / S.S. Silin. - M.: Mechanical Engineering, 1979. - pp. 152.
4. Makarov, A.D. *Cutting Process Optimization* / A.D. Makarov. - M.: Mechanical Engineering, 1976. - pp. 278..
5. Podzey, A.V. *Technological Residual Stresses* / A.V. Podzey. - M.: Mechanical Engineering, 1973. - pp. 216..
6. Matalin, A.A. *Machining Technology* / A.A. Matalin. - M.: Mechanical Engineering, 1977. - pp. 462.
7. Starkov, V.K. *Physics and Material Cutting Optimization* / V.K. Starkov. - M.: Mechanical Engineering, 2009. - pp. 640.
8. Abramov, V.V. *Stresses and Deformations at Steel Thermal Treatment* / V.V. Abramov. - Kiev; Donetsk: Higher School, 1985. - pp. 133.
9. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel / ed. G. Totten, M. Howes, T. Inoue. - Ohio: ASM International, Materials Park, 2002.
10. Mahdi, M. Applied mechanics in grinding. Part IV. The mechanism of grinding induced phase transformation / M. Mahdi, L. Zhang // International Journal of Machine Tools and Manufacture. - 1995. - № 1.
11. Mahdi, M. Applied mechanics in grinding. Part V. Thermal residual stresses / M. Mahdi, L. Zhang // International Journal of Machine Tools and Manufacture. - 1997. - № 1.
12. Mahdi, M. Applied mechanics in grinding. Part VI. Residual stresses and surface hardening by coupled thermo-plasticity and phase transformation / M. Mahdi, L. Zhang // International Journal of Machine Tools and Manufacture. - 1998. - № 1.

Статья поступила в редколлегию 20.03.18.

Рецензент: д.т.н., профессор Костромского государственного университета Михайлов С.В.

Сведения об авторах:

Фоменко Роман Николаевич, к.т.н., доцент кафедры технологии авиационных двигателей и общего машиностроения Рыбинского государственного авиационного технического университета им. П.А. Соловьева, 152934, Россия, Ярославская область, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53; тел.: 8(4855)222-091; e-mail: fomenko85@mail.ru.

Fomenko Roman Nikolaevich, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. of Aircraft Engine Technology and General Mechanical Engineering, Soloviyov State Aircraft Technical University of Rybinsk, e-mail: fomenko85@mail.ru.

Тимофеев Михаил Владимирович, к.т.н., доцент кафедры технологии авиационных двигателей и общего машиностроения Рыбинского государственного авиационного технического университета им. П.А. Соловьева, 152934, Россия, Ярославская область, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53; тел.: 8(4855)222-091; e-mail: mv-timofeev@yandex.ru.

Timofeev Mikhail Vladimirovich, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. of Aircraft Engine Technology and General Mechanical Engineering, Soloviyov State Aircraft Technical University of Rybinsk, e-mail: mv-timofeev@yandex.ru.