

УДК 621.914

Обеспечение качества изготовления прецизионных поверхностей деталей на многоцелевых станках с ЧПУ

М.В. Носов, А.И. Кондаков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Controlling the accuracy of manufacturing surfaces of parts by CNC machining centers

M.V. Nosov, A.I. Kondakov

Bauman Moscow State Technical University, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation.



e-mail: kondakov1950@mail.ru, mihaile_nosov@mail.ru



Качество корпусных деталей сложной геометрической формы, имеющих прецизионные цилиндрические поверхности, обеспечить достаточно сложно. Изготовление на многоцелевых станках с ЧПУ прецизионных поверхностей требует нетривиальных технологических приемов и, прежде всего, рациональной стратегии съема припуска на операциях чистовой (окончательной) обработки. Разработан метод обеспечения точности изготовления прецизионных поверхностей деталей на многоцелевых станках с ЧПУ. Проведена экспериментальная проверка предложенного метода, выполненная на образцах из труднообрабатываемого материала. Показана возможность стабильного обеспечения точности диаметральных размеров поверхностей, соответствующей IT5, IT6, в автоматическом цикле.

Ключевые слова: деталь, прецизионная поверхность, точность, обеспечение, станок с ЧПУ, качество.



The high quality of base members of complex geometrical shapes with precise cylindrical surfaces is quite difficult to provide. Manufacturing accurate surfaces using CNC machines requires unconventional processing methods and, first of all, a reasonable strategy for stock removal during finishing operations. A method of ensuring the accuracy of precise surfaces of parts during CNC machining is developed. The proposed method is verified experimentally on samples made of a hard-to-treat material. The possibility of this method to ensure the required accuracy of diametrical sizes of surfaces corresponding to IT5 and IT6 in an automatic cycle is discussed.

Keywords: quality, part, precise surface, accuracy, CNC machine.

Производственные проблемы при изготовлении машин обусловлены обеспечением качества корпусных деталей, имеющих сложную геометрическую форму и прецизионные цилиндрические поверхности с точностью, например, диаметральных размеров, соответствующей IT6, IT5 и выше. Оси этих поверхностей часто весьма сложно расположены в пространстве (рис. 1). Материалы, из которых изготовлены такие детали, например, железоникелевые сплавы 80НХС, 81НМА, 83НФ, трудно обрабатываются и при лезвийной механической обработке вызывают

повышенный износ инструмента, образование нароста на режущих кромках, наклеп на обработанных поверхностях, шаржирование поверхностного слоя при абразивной обработке.

Традиционные технологии изготовления подобных поверхностей деталей предполагают последовательное выполнение всех основных этапов их обработки (черновой, получистовой, чистовой, термической, окончательной). Указанные виды обработки, как правило, производятся в разных, требующих к тому же особых условий реализации, операциях, что

сопряжено со значительными расходами производственных ресурсов и соответствующими затратами. При этом гарантии обеспечения заданного качества изготовления прецизионных поверхностей (и детали в целом) отсутствуют.

Современные многоцелевые, в частности, фрезерно-токарные станки с ЧПУ предоставляют широкие возможности для построения высококонцентрированных операций изготовления сложных корпусных деталей [1, 2]. Однако изготовление на них прецизионных поверхностей требует нетривиальных технологических приемов.

Реализация традиционной методологии построения операций на станках с ЧПУ, базирующейся на предпочтительном использовании простых (элементарных) технологических переходов, каждый из которых выполняется самостоятельным инструментом, обуславливает значительный рост производственных затрат. За 15 лет эксплуатации многоцелевого станка с ЧПУ затраты на использованный инструмент становятся сопоставимыми с первоначальной стоимостью станка (с учетом монтажа).

Возникло противоречие между технологическими возможностями современного оборудования и традиционной методологией технологического проектирования [3, 4]. Возможным путем его разрешения является разработка методики обеспечения качества изготовления прецизионных поверхностей корпусных деталей в концентрированных операциях лезвийной обработки на многоцелевых станках с ЧПУ. Операции могут включать как инструментальные (сложные) переходы обработки, так и измерительные переходы. Разработка указанной методики представляет собой актуальную научно-техническую задачу.

Цель работы — оценка возможности изготовления на многоцелевом станке с ЧПУ прецизионных поверхностей деталей лезвийной обработкой.

Авторами данной статьи разработан и апробирован метод обеспечения качества изготовления прецизионных поверхностей деталей сложных, наукоемких машин в мелкосерийном производстве. При его реализации выполняют следующие действия:

1) заготовку устанавливают в приспособление на предварительно настроенный многоцелевой станок с ЧПУ;

2) проводят черновую и получистовую обработку поверхности, оставляя припуск на чистовую (окончательную обработку) и обеспечивая точность размера обработанной поверхности по IT9 (при заданной точности окончательного размера по IT6) или IT8 (при заданной точности окончательного размера по IT5);

3) перед началом чистовой (окончательной) обработки измеряют фактический размер поверхности контактным датчиком, установленным на станке, по автоматическому циклу и заданной стратегии измерения;

4) не снятый припуск на чистовую (окончательную) обработку разделяют на две-три равные части в зависимости от заданной точности окончательного размера поверхности;

5) чистовую (окончательную) обработку поверхности выполняют одним инструментом при неизменном режиме резания. Припуск снимают за 2–3 рабочих

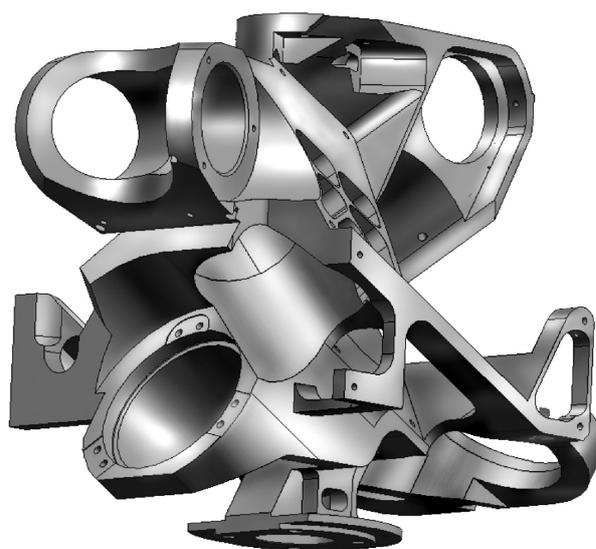


Рис. 1. Эскиз корпусной детали

хода, перед выполнением каждого из которых вводят коррекцию положения инструмента по результатам измерения. Стратегия измерения, расчет и способ ввода коррекции в представленной статье не рассматриваются. Глубина резания в каждом рабочем ходе отличается от глубины резания предыдущего хода на величину введенной коррекции. В остальном же для каждого рабочего хода стремятся в наибольшей мере сохранить одинаковые с другими ходами условия его выполнения, тем самым стабилизируя влияние элементарных погрешностей обработки [4] на точность выдерживаемого размера и минимизируя его вводимой коррекцией [5].

С целью оценки возможности использования предложенного метода автоматизированного обеспечения точности размеров поверхности, соответствующей IT6, при лезвийной обработке на станках с ЧПУ проведено экспериментальное исследование. Была выполнена лезвийная механическая обработка внутренней цилиндрической поверхности $\varnothing 25\text{H6}$; $R_a = 0,63$ мкм образца (рис. 2) из магнито-мягкого двойного железоникелевого сплава 79НМ (ГОСТ 10160–75). Заготовка — пруток круглый горячекатаный 45100-I-79НМ-A-ГОСТ 10160–75 (рис. 2, а). Маршрут изготовления поверхности $\varnothing 25\text{H6}^{(+0,013)}$ образца лезвийной обработкой по рекомендациям представлен в табл. 1.

При традиционной методологии технологического проектирования каждый переход выполняют самостоятельно расточным инструментом, предварительно настроиваемым на выдерживаемый диаметральный размер. Переходы 1–3 могут выполняться в одной операции на оборудовании нормальной точности.

С целью улучшения обрабатываемости материала и снижения уровня остаточных напряжений в поверхностном слое между получистовым и чистовым растачиванием проводят высокотемпературный отжиг. Тонкое и алмазное растачивание обычно выполняют на оборудовании повышенной точности.

В соответствии с рекомендациями предложенного

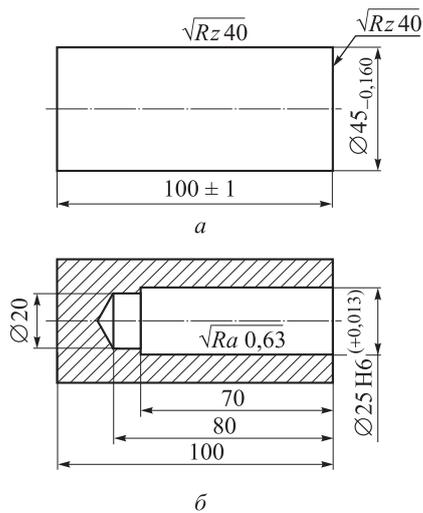


Рис. 2. Экспериментальный образец:
а — исходная заготовка; б — готовая деталь с прецизионной поверхностью

метода маршрут изготовления поверхности $\text{Ø}25\text{H}6$ (см. табл. 1) был изменен: самостоятельные технологические переходы растачивания черного и получистового (2, 3) заменены одним инструментальным переходом, а переходы 5–7 (см. табл. 1) — тремя рабочими ходами одного технологического перехода, для каждого из которых определены значения заданных допусков выдерживаемого размера (см. табл. 1).

Предлагаемый маршрутный процесс изготовления поверхности $\text{Ø}25\text{H}6^{(+0,013)}$ состоял из трех технологических операций:

1) операция 005, включающая технологические переходы сверления и растачивания черного (получистового) на фрезерно-токарном станке с ЧПУ;

2) операция 010 — высокотемпературный отжиг при температуре $1\ 150\text{ °C}$ в вакуумной печи (давление 10^{-4} мм рт. ст.);

3) операция 015 фрезерно-токарная с ЧПУ, включающая один технологический инструментальный переход — растачивание чистовое (окончательное), выполнявшийся за три рабочих хода, перед каждым из которых выполнялся вспомогательный переход измерения диаметрального размера и введение коррекции положения инструмента.

По завершении операции 005 допуск диаметрального размера должен соответствовать Н9, а по завершении операции 015 — Н6.

Эксперимент выполняли на фрезерно-токарном многоцелевом станке с ЧПУ W518MT фирмы Willemin Macodel. Для чистовой (окончательной) обработки применяли токарную пластину Mitsubishi CCGT060201L-SSVP15TF из среднезернистого твердого сплава на основе карбида вольфрама с кобальтовой связкой; покрытие PVD — (Al,Ti)N с твердостью 91,5 HRA и упрочненным поверхностным слоем; смазывающее-охлаждающая жидкость — Mobilcut 232 водорастворимая, полусинтетическая. Зажим образца осуществляли с помощью гидравлического цангового патрона SpannERSPA-65/8 с посадкой непосредственно на конический фланец шпинделя (ГОСТ12595 тип К, DIN55026 ISO702/1) с цангой SP65ERLd45.

Для реализуемого процесса разработана операционная технология (рис. 3), в соответствии с которой в данной серии экспериментов выполнена обработка 10 образцов (рис. 4), поверхности $\text{Ø}25\text{H}6$ которых подвергались контролю. Растачивание чистовое проводили при глубине резания в соответствии с результатами предварительного расчета припусков и результатами контроля, подача составляла 0,1 мм/об, скорость резания 35,5 м/мин (частота вращения образца 450 об/мин).

Предварительный контроль обрабатываемой заготовки выполняли непосредственно на станке. Система управления (регулирования) состояла из измерительного щупа, устанавливаемого в шпиндель станка, а также системы обработки полученной информации и выдачи сигнала на подрегулирование (подналадку) технологической системы. Использовалась контактно-измерительная система Renishaw MP40 с оптическим типом передачи сигналов между датчиком и системой ЧПУ.

При окончательном контроле диаметрального размера $\text{Ø}25\text{H}6^{(+0,013)}$ использовали контрольно-измерительную машину DEA Micra фирмы HEXAGON Metrology с погрешностью измерения (по ISO 10360-2) $E = 1,0 + L/400$ мкм, где L — измеряемая длина, мм. Отклонения формы отверстия контролировали с помощью прибора TALYROND 365 фирмы Taylor Hobson с погрешностями:

- радиальной (над уровнем стола) $\pm 0,02$ мкм + $+ 0,0003$ мкм/мм;
- осевой (радиус от центра) $\pm 0,02$ мкм + $+ 0,0003$ мкм/мм.

Шероховатость поверхности $\text{Ø}25\text{H}6$ измеряли прибором FORMTALYSURF фирмы Taylor Hobson с

Таблица 1

Маршрут изготовления поверхности $\text{Ø}25\text{H}6^{(+0,013)}$ лезвийной обработкой [4, 6, 7]

Номер перехода	Наименование технологического перехода	Квалитет размера	Допуск на диаметральный размер, мм	Параметр шероховатости поверхности Ra , мкм
1	Сверление	IT11	0,13	12,5
2	Растачивание черновое	IT10	0,084	6,4
3	Растачивание получистовое	IT9	0,052	3,9
5	Растачивание чистовое	IT8	0,033	3,2
6	Растачивание тонкое	IT7	0,021	1,6
7	Растачивание алмазное	IT6	0,013	0,63

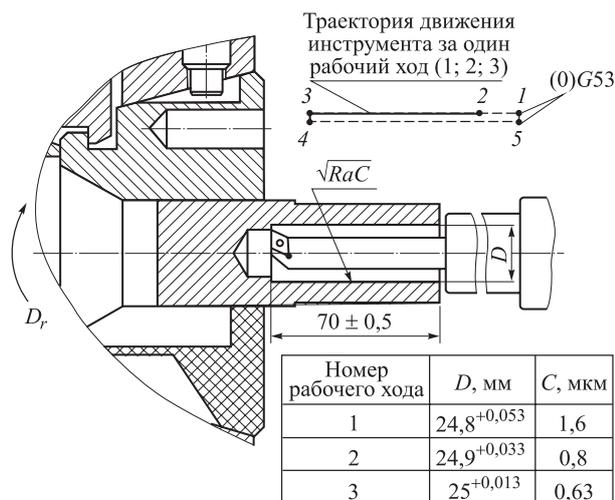


Рис. 3. Эскиз операции чистового растачивания образца

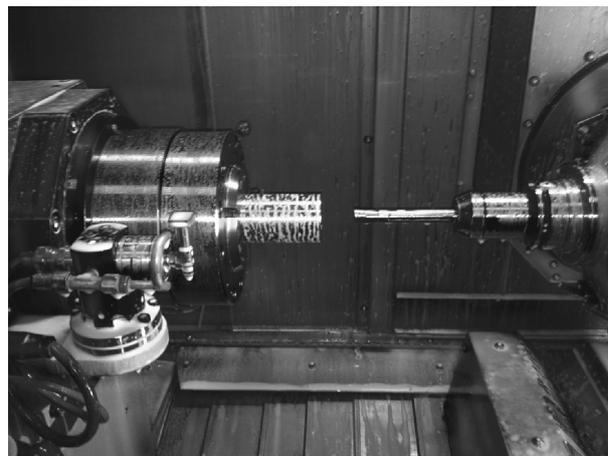


Рис. 4. Растачивание образца на фрезерно-токарном станке с ЧПУ Willemin Macodel

Таблица 2

Результаты контроля показателей качества поверхности Ø25Н6 обработанных образцов

Номер образца	Размер поверхности Ø25Н6 ^(+0,013) , мм	Шероховатость поверхности Ra, мкм	Отклонение от круглости поверхности в измеряемом сечении, мкм	Конусообразность поверхности, мкм
1	25,008	0,3266	0,57	2,0
2	25,012	0,3452	0,73	3,0
3	25,004	0,4231	0,61	2,0
4	25,008	0,4028	0,81	2,0
5	25,009	0,4373	0,93	3,0
6	25,011	0,3014	0,65	4,0
7	25,011	0,3106	0,52	5,0
8	25,007	0,3127	0,58	2,0
9	25,010	0,3304	0,34	2,0
10	25,009	0,3418	0,83	3,0

неопределенностью измерения параметров шероховатости 2% + 4 нм.

Замеры наладочного образца показали, что допуск на размер Ø25Н6 не обеспечен из-за значительной конусообразности поверхности: на длине 70 мм она составила 11 мкм. Причиной ее возникновения, очевидно, явилась переменная жесткость технологической системы в направлении, перпендикулярном оси обрабатываемой заготовки, обусловленная консольной схемой установки последней. Перед обработкой 10 образцов в управляющую программу было введено предсказание траектории, в значительной мере компенсировавшее выявленную погрешность. Автоматизированное введение предсказания траектории относительного движения инструмента в данной статье не рассматривается. Результаты контроля показателей качества поверхности Ø25Н6 для 10 обработанных образцов сведены в табл. 2.

Все контролируемые показатели качества (см. табл. 2) находятся в пределах соответствующих полей допусков. Математическое ожидание диаметального размера поверхности составило 25,009 мм при среднеквадратическом отклонении $\sigma = 1,875$ мкм. Коэффициент точности для исследуемого процесса

изготовления поверхности Ø25Н6, как отношение поля рассеяния диаметального размера поверхности к допуску на размер, составил 0,865, что свидетельствует об удовлетворительной точности и достаточной стабильности его результатов [8].

Кроме описанного выполнены и другие экспериментальные исследования с целью оценки возможности использования предложенного метода при обеспечении качества изготовления прецизионных поверхностей. Проведена производственная апробация метода при изготовлении конкретных деталей из различных материалов (табл. 3).

Таблица 3

Характеристика поверхностей деталей, изготовлявшихся при апробации метода

Материал детали	Выдерживаемый размер, качество поверхности	Длина поверхности, мм
Сталь 20Х	Ø25Н6	50
83НФ	Ø50Н6	50
50Н	Ø25Н5	20
ВТ1	Линейный размер, IT5	15
АМг3;	Ø50Н5	70
АМг6	Ø70Н6	85

Полученные результаты свидетельствуют о возможности устойчивого автоматизированного обеспечения заданного качества прецизионных поверхностей. Однако определение условий, границ эффективного применения, а также совершенствование методики автоматизированной реализации изложенного требуют дополнительных исследований.

Выводы

1. Возможности современного высокоавтоматизированного оборудования с ЧПУ обеспечивают качество изготовления прецизионных поверхностей деталей лезвийной обработкой.

2. Предложенный метод, реализующийся на много-

целевых станках с ЧПУ, позволяет стабильно обеспечивать точность линейных и диаметральных размеров поверхностей, соответствующую IT6 для деталей из сталей и железоникелевых сплавов и IT5 для деталей из алюминийево-магниевого сплавов в мелкосерийном производстве.

3. Использование предложенного метода в автоматизированном цикле способствует:

- сокращению количества необходимых технологических операций за счет их концентрации и исключения самостоятельных операций окончательной обработки;
- сокращению количества лезвийного инструмента, необходимого для выполнения технологических операций;
- исключению длительных ручных измерений и их возможных ошибок.

Литература

- [1] Segerlin C. High Speed Cutting. *Cutting Tool Engineering*, 2006, vol. 58, no. 12, pp. 36–39.
- [2] Штриплинг Л.О., Попов М.Г. Применение высокоскоростного фрезерования точных отверстий для совершенствования технологии производства корпусных деталей из алюминия. *Омский научный вестник*, 2010, № 3, с. 63–67.
- [3] Кумметц Й., Сладков Д.В. Быстрое и точное фрезерование с высоким качеством обработанной поверхности. *Автоматизация в промышленности*, 2013, № 5, с. 23–26.
- [4] Дальский А.М., Кондаков А.И., ред. *Технология машиностроения. В 2 т.: Т. 1. Основы технологии машиностроения*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 478 с.
- [5] Larry Haftl. Adaptive Controls Save Tools and Time. *American Machinist*, 2007, Jan. 24, pp. 25–28.
- [6] Дальский А.М., Косилова А.Г., Мещеряков Р.К., Суслов А.Г., ред. *Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 1*. Москва, Машиностроение-1, 2001. 912 с.
- [7] Дальский А.М., Косилова А.Г., Мещеряков Р.К., Суслов А.Г., ред. *Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2*. Москва, Машиностроение-1, 2001. 944 с.
- [8] ГОСТ Р 50779.44–2001. *Статистические методы. Показатели возможностей процессов. Основные методы расчета*. Москва, Изд-во стандартов, 2004. 20 с.

References

- [1] Segerlin S. High Speed Cutting. *Cutting Tool Engineering*, 2006, vol. 58, no. 12, pp. 36–39.
- [2] Shtripling L.O., Popov M.G. Primenenie vysokoskorostnogo frezerovaniia tochnykh otverstii dlia sovershenstvovaniia tekhnologii proizvodstva korpusnykh detalei iz aliuminiia [Application of high-speed milling for precise holes drilling for perfection of manufacture techniques of case work-pieces from aluminum] *Omskii nauchnyi vestnik*. [Omsk Scientific Bulletin]. 2010, no. 3, pp. 63–67.
- [3] Kummets I., Sladkov D.V. Bystroe i tochnoe frezerovanie s vysokim kachestvom obrabotannoi poverkhnosti [Fast and accurate cutting with high quality surface finish]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti* [Industrial Automation]. 2013, no. 5, pp. 23–26.
- [4] *Tekhnologiia mashinostroeniia v 2 t., t.1 : Osnovy tekhnologii mashinostroeniia* [Engineering Technology in 2 vol., vol. 1. Fundamentals of Mechanical Engineering Technology]. Ed. Dal'skogo A.M., Kondakova A.I. Moscow, Bauman Press, 2011. 478 p.
- [5] Larry Haftl. Adaptive Controls Save Tools and Time. *American Machinist*, 2007, january 24, pp. 25–28.
- [6] *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelia. V 2 t., t. 1* [Directory technologist-mechanic. In 2 vol., vol. 1] Ed. Dal'skii A.M., Kosilova A.G., Meshcheriakov R.K., Suslov A.G. Moscow, Mashinostroenie-1 publ., 2001. 912 p.
- [7] *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelia. V 2 t., t. 2* [Directory technologist-mechanic. In 2 vol., vol. 2] Ed. Dal'skii A.M., Kosilova A.G., Meshcheriakov R.K., Suslov A.G. Moscow, Mashinostroenie-1 publ., 2001. 944 p.
- [8] GOST R 50779.44–2001 *Statisticheskie metody. Pokazateli vozmozhnostei protsessov. Osnovnye metody rascheta* [State Standard 50779.44–2001 Statistical methods. Process capability indices. The main methods of calculation]. Moscow, Standartinform publ., 2004. 20 p.

Информация об авторах

НОСОВ Михаил Валентинович (Москва) — аспирант кафедры «Технология машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: mihail_nosov@mail.ru).

КОНДАКОВ Александр Иванович (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: kondakov1950@mail.ru).

Information about the authors

NOSOV Mikhail Valentinovich (Moscow) — Post-Graduate of «Mechanical Engineering Technology» Department, Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: mihail_nosov@mail.ru).

KONDAKOV Aleksandr Ivanovich (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor of «Mechanical Engineering Technology» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: kondakov1950@mail.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие

«Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением»

в 2-х томах
автора А.Л. Воронцова.

В первом томе учебного пособия изложены теория процессов обработки металлов давлением и результаты теоретических и экспериментальных исследований различных операций. Приведены формулы и методы расчета основных технологических параметров с учетом исходной анизотропии свойств штампуемого материала, деформационной анизотропии, упрочнения, а также упругих деформаций формообразующего инструмента. Уточнены важные положения теории обработки металлов давлением, относящиеся к кривым упрочнения, а также к учету влияния масштаба обрабатываемой заготовки, скорости деформации и температурного эффекта. Рассмотрены теоретические методы прогнозирования разрушения заготовки и анализа распределения волокон структуры в получаемых изделиях, образования утяжин и застойных зон.

Во втором томе учебного пособия рассмотрены результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов комбинированного выдавливания, радиального выдавливания, выдавливания с комбинированным нагружением, осадки, высадки, прошивки, вытяжки с утонением стенки, контурной осадки, калибровки, закрытой объемной штамповки, чеканки, формовки, секционной штамповки, дорнования, а также специальные операции гибки волокнистых композиционных материалов, сжатия порошковых заготовок в закрытой матрице и осадки малопластичных материалов в оболочках. Приведены формулы и методы расчета основных технологических параметров различных способов волочения труб и прутков. Изложен метод функции напряжений.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru