



УДК 621.77.01:004.942

Поступила 20.11.2015

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКИ ВТУЛОК ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА С ГРАДИЕНТОМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАФИТНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ ПО СЕЧЕНИЮ

FINITE-ELEMENT MODELING OF HOT FORMING OF BUSHES MADE FROM HIGH-STRENGTH CAST IRON WITH A GRADIENT DISTRIBUTION OF GRAPHITE INCLUSIONS OVER CROSS-SECTION

А. И. ПОКРОВСКИЙ, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Купревича, 10. E-mail: arturu@tut.by,

П. Е. ЛУЩИК, Республиканское инновационное унитарное предприятие «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник», г. Минск, Беларусь, ул. Я. Коласа, 24. E-mail: pavel86lu@gmail.com

A. I. POKROVSKY, Physical and Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 10, Kuprevich str. E-mail: arturu@tut.by,

P. E. LUSHCHIK, Scientific and technological park «Polytechnic» at the Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 24, Kolasa str. E-mail: pavel86lu@gmail.com

Выполнено имитационное моделирование процесса прямого горячего выдавливания втулок из высокопрочного чугуна, в частности, оценка вероятности образования трещин, величин напряжений, деформаций, их изменения в процессе штамповки. Отличительной особенностью объектов моделирования являлось использование при деформировании приемов, обеспечивающих градиент распределения графитных включений в структуре по сечению втулок. Полученные значения использованы в конкретных технологических процессах, используемых на практике.

Imitation modeling of direct hot extrusion of bushes made from high-strength cast iron is performed using finite-element method. The evolution of stress and strain fields during processing and the probability of crack formation are evaluated. The specific feature of the work is that during hot forming a special technique was used which permitted obtaining a gradient distribution of graphite inclusions over the cross-section of bushes. The results of modeling are used in certain technologies which are implemented in industrial practice.

Ключевые слова. *Горячее выдавливание, высокопрочный чугун, втулки, металлическая матрица, включения графита, метод конечных элементов.*

Keywords. *Hot extrusion, high-strength cast iron, bushes, metal matrix, graphite inclusions, finite-element method.*

Введение

Удельный вес машиностроительных изделий, получаемых с использованием технологий пластического формообразования, возрастает. Это обусловлено рядом преимуществ обработки металлов давлением: устранением литейных дефектов, возможностью значительного формоизменения заготовки при кратковременном приложении нагрузки, обеспечением малых припусков на механическую обработку по сравнению с литьем, значительным уменьшением отходов металла по сравнению с обработкой резанием, высокой производительностью труда, измельчением структуры и улучшением механических свойств металла заготовки. Многие базовые положения в области обработки давлением были сформулированы в 40-х годах XX века научной школой Физико-технического института НАН Беларуси под руководством академиков С. И. Губкина, В. П. Северденко [1, 2].

Для труднодеформируемых материалов в ФТИ НАН Беларуси разработаны технологические процессы горячего гидродинамического выдавливания [3], которые в дальнейшем применены и для получения изделий из чугуна [4]. Исследования технологической пластичности различных классов чугунов, выполненные под руководством акад. А. П. Ласковнева, канд. техн. наук Л. Р. Дудецкой [5, 6], открыли



Рис. 1. Заготовка детали «цилиндр нагнетательного плунжера домкрата грузового автомобиля» в виде шестигранного прутка, полученная из цилиндрической заготовки высокопрочного чугуна горячим выдавливанием: *а* – с нарушением параметров технологии (дефект, так называемый «ерш» – множество надрывов на поверхности); *б* – при оптимальных параметрах деформации

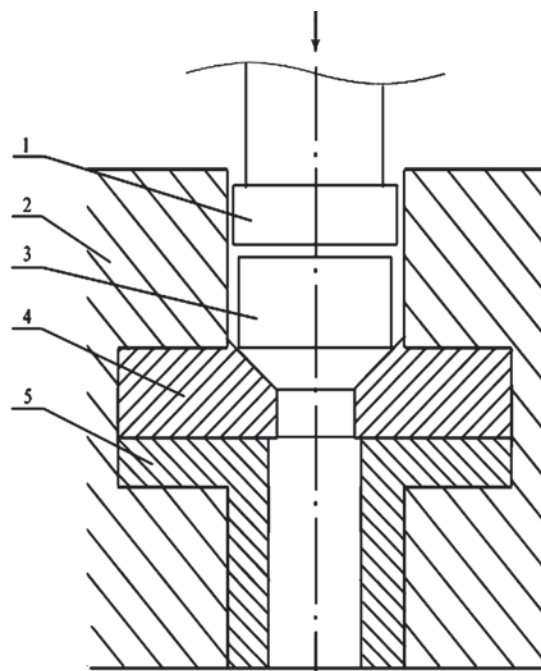


Рис. 2. Схема прямого выдавливания чугунного прутка: 1 – пуансон; 2 – контейнер; 3 – чугунная заготовка; 4 – матрица; 5 – направляющая втулка. Стрелкой указано направление приложения нагрузки

новый взгляд на процесс формообразования этих материалов, считавшихся ранее хрупкими. Они показали, что из всех методов обработки давлением для чугунов предпочтительнее штамповка выдавливанием, при которой наиболее полно реализуется схема неравномерного всестороннего сжатия, в наибольшей мере способствующая повышению пластичности. Установлено, что класс высокопрочных чугунов, содержащих в структуре включения графита шаровидной формы, является наиболее технологичным для процесса выдавливания [7]. Показано, что для уменьшения вероятности появления трещин и повышения равномерности деформации целесообразен подогрев штамповой оснастки до температуры 200–400 °С, а также использование противодействия. Изучены особенности структурообразования деформированного чугуна и показано, что с помощью обработки давлением можно не только придать изделию из чугуна точную форму и устранить ряд литейных дефектов, но и получать широкий спектр структур, ранее не присущих чугунам. Такие структуры обеспечивают существенное улучшение механических, триботехнических и эксплуатационных характеристик, не только по сравнению с показателями литого чугуна, но и с уровнем легированных сталей. В работах [8, 9] теоретически обосновано и экспериментально доказано, что включения графита и цементита в структуре чугуна при его выдавливании не разрушаются, а претерпевают пластическую деформацию.

Следует признать сложность использования технологий штамповки чугунных изделий, одной из причин которой является многофакторность температурно-силовых параметров процесса (температура нагрева заготовки, усилие прессования, величина противодействия и др.). Следствием неправильного эмпирического выбора этих данных зачастую является брак в виде трещин на поверхности (рис. 1).

Технологи прекрасно представляют, что отработка параметров изготовления конкретных изделий из труднодеформируемых материалов в промышленных условиях – достаточно долгий и затратный процесс. Наиболее эффективным путем решения проблемы выбора оптимальных параметров на сегодняшний день является проведение предварительных экспериментов с использованием имитационного моделирования технологических процессов. Авторы имеют определенный опыт моделирования процессов напряженно-деформированного состояния при горячем выдавливании чугуна и его структурообразования [9], однако он получен на простых изделиях типа прутков, схема получения которых приведена на рис. 2.

Известно, что при горячем выдавливании чугуна шаровидные включения графита в структуре вытягиваются в подобия веретен [7], при этом по сравнению с литым состоянием изменяется и площадь их сечений, выходящих на поверхность трения (рис. 3).

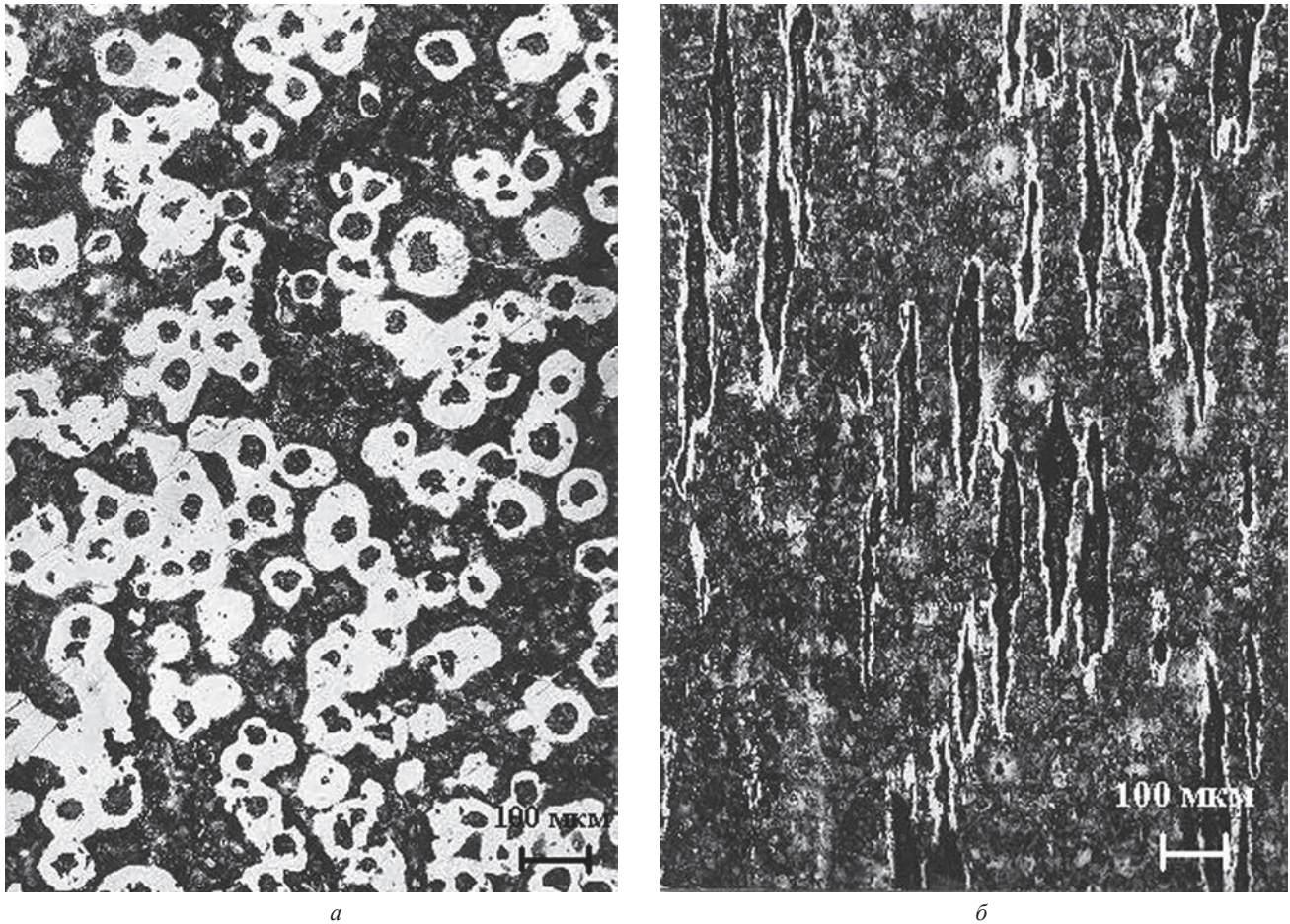


Рис. 3. Микроструктура высокопрочного чугуна в литом (а) и деформированном (б) состоянии (продольное сечение). $\times 100$. Травлено ниталем

Для практики гораздо больший интерес представляет получение из чугуна с использованием деформирования не прутков, а высококачественных втулок, которые во многих случаях эксплуатации выполняют функции подшипника скольжения. Требуемый сортамент таких втулок очень широк, а триботехнические условия работы весьма разнообразны. Причем «рабочей» (трущейся) поверхностью втулки может быть как наружная, так и внутренняя цилиндрическая поверхность, а в ряде случаев (например, уплотнительные элементы) – торцовая.

Следует отметить, что при обычном варианте прямого выдавливания отсутствует градиент распределения включений по сечению, т. е. вытянутые включения распределены по сечению равномерно. Однако одинаковая степень деформации по всему объему втулки, а также равномерное распределение графитных включений по сечению не всегда эффективны. Как известно, графит в структуре многих машиностроительных изделий выполняет функции твердой смазки, причем условия работы зачастую требуют наличия именно повышенного количества включений графита на рабочей поверхности (определенной доли от площади всего контакта). В остальном объеме изделия количество графита может быть минимальным.

Специальными технологическими приемами можно добиться градиента в распределении степени деформации по сечению втулки и, тем самым, регулировать долю площади, занимаемой графитом на поверхности трения, приближая ее к оптимальной для условий работы данной детали. С точки зрения методов обработки давлением материалов с однородной структурой (например, углеродистых сталей) эти методы известны. Они заключаются в получении втулки путем выдавливания трубчатой заготовки через отверстие матрицы. При этом в отверстие заготовки дополнительно вводится штамповый инструмент в виде центрирующей иглы. Градиент степени деформации достигается уменьшением диаметров матрицы или иглы по сравнению с наружным или внутренним диаметром заготовки. В результате получается поковка либо с меньшим отверстием, чем у заготовки, либо с меньшим наружным диаметром.

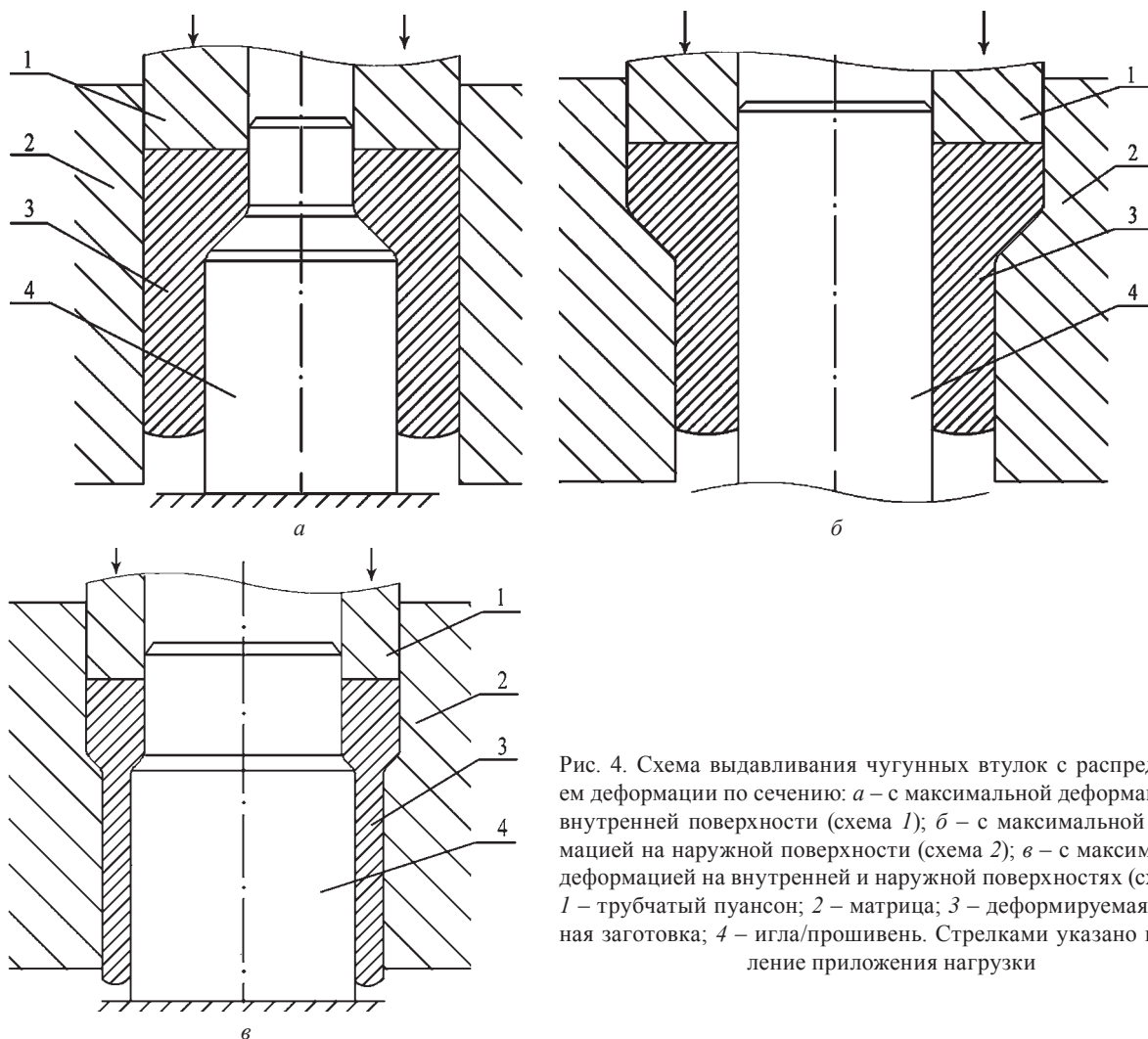


Рис. 4. Схема выдавливания чугунных втулок с распределением деформации по сечению: *а* – с максимальной деформацией на внутренней поверхности (схема 1); *б* – с максимальной деформацией на наружной поверхности (схема 2); *в* – с максимальной деформацией на внутренней и наружной поверхностях (схема 3): 1 – трубчатый пуансон; 2 – матрица; 3 – деформируемая чугунная заготовка; 4 – игла/прошивень. Стрелками указано направление приложения нагрузки

В случае обработки давлением материалов с гетерогенной структурой, например чугунов, такие способы приводят к кардинальным изменениям не только металлической матрицы, но и формы, а главное распределения включений графита в структуре чугуна. Они обеспечивают существенное изменение триботехнических характеристик материала, обладают определенной новизной и запатентованы [10, 11]. Примеры таких схем выдавливания втулок с градиентом деформации по сечению приведены на рис. 4 [10]. В первом примере (рис. 4, *а*) максимальная деформация приходится на наружную поверхность, во втором (рис. 4, *б*) – на внутреннюю поверхность. Для сравнения на рис. 4, *в* представлена схема выдавливания, при которой градиент деформации присутствует по обоим краям втулки: наружному и внутреннему [11].

Цель работы – имитационное моделирование процесса горячего выдавливания втулок из высокопрочного чугуна, в частности, оценка вероятности образования трещин, напряжений, деформаций, их изменения в процессе штамповки, а также построение так называемых диаграмм оптимальной деформируемости. Отличительной особенностью объектов моделирования являлось использование при деформировании приемов, обеспечивающих градиент распределения графитных включений в структуре по сечению втулок.

Объекты, материалы и методики исследования

Объекты моделирования были максимально приближены по геометрическим размерам к реальным изделиям типа втулок различного машиностроительного назначения (детали трансмиссии пассажирских автобусов, колесных тягачей, посевных агрегатов сельхозтехники).

Материалом для изготовления втулок являлся высокопрочный чугун марки ВЧ 50 (ГОСТ 7293-85) следующего химического состава: 3,2-3,6% С; 1,7-2,1% Si; 0,5-0,7% Mn; 0,4-0,6% Ni; 0,04-0,06% Mg, до 0,08% P, до 0,01% S. Плавку чугуна проводили в индукционной высокочастотной печи марки ИСТ-016

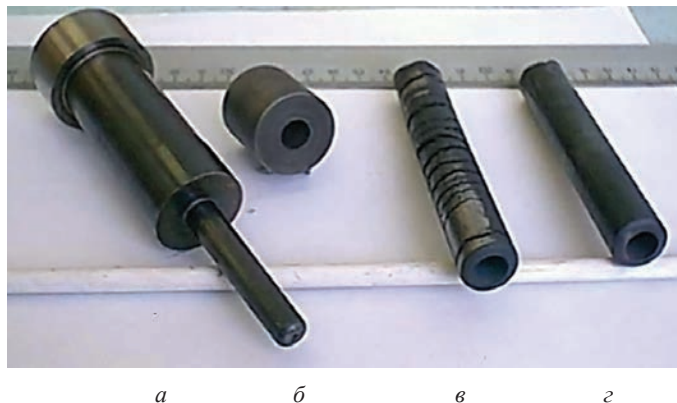


Рис. 5. Инструмент для получения и полуфабрикаты детали «направляющая втулка клапана» двигателя Д-240 Минского моторного завода: *а* – пуансон с иглой; *б* – исходная заготовка; *в* – втулка, полученная без использования противодействия (с трещинами); *г* – качественная втулка, полученная с использованием противодействия

емкостью 150 кг по известной технологии, разливку осуществляли в вертикальные песчано-глинистые формы.

Обработку чугуна давлением выполняли методом прямого выдавливания на серийном кривошипно-шатунном прессе марки К2130 усилием 100 т в специальной подогреваемой до 400 °С штамповой оснастке. Скорость движения пуансона составляла около 1 м/с. Заготовками служили механически обработанные отливки в виде втулок. Их выдавливали через круглое отверстие конической матрицы с использованием иглы, центрирующей внутреннее отверстие заготовки, получая на выходе деформированные поковки в виде втулок различной длины. Предварительно эмпирически и теоретически определили оптимальную относительную степень деформации для высокопрочного чугуна, которая составила 60–80%. Практика показала, что при этих значениях минимальна вероятность образования дефектов структуры и достигаются высокие показатели механических свойств.

Рассматривали три схемы выдавливания, изображенные на рис. 4, *а–в*. Условия всестороннего неравномерного сжатия обеспечивали с использованием противодействия. Для этого на выходе деформированного изделия из штамповой оснастки устанавливали пневмоцилиндр, давление в котором подбирали экспериментально так, чтобы получать качественное изделие без трещин. Применяли индукционный нагрев заготовок под деформацию, общее время которого не превышало 50–90 с. Температура деформации составляла 900–1000 °С, контролировали ее оптическим пирометром, охлаждение полученных втулок проводили на спокойном воздухе.

На рис. 5 показаны примеры деформирующего инструмента (пуансон с иглой), а также заготовки из чугуна и получаемые втулки. Эти фотографии иллюстрируют, как реализуется на практике одна из схем градиентной деформации, в частности, вариант «максимальное обжатие снаружи втулки» (см. рис 4, *б*). В этом случае диаметр иглы соответствовал внутреннему отверстию в заготовке.

При оценке полей деформаций и напряжений основывались на подходе, изложенном в известном справочнике [12]. Разработку электронных моделей системы «матрица-пуансон-заготовка» проводили с использованием системы автоматизированного проектирования NX 8.5 и набора средств моделирования технологических процессов «Visual-Environment 9.6». Теплофизические и механические свойства материалов при высоких температурах задавали на основании анализа литературных данных [13, 14].

При анализе результатов компьютерного моделирования проводили оценку вероятности возникновения трещин (D_f) в исследуемых образцах на основании модели Кокрофта–Латама [15], в основе которой лежит уравнение:

$$D_f = \int_0^{\bar{\varepsilon}} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon}, \quad (1)$$

где σ^* – максимальное главное напряжение; $\bar{\sigma}$ – эффективное напряжение; $\bar{\varepsilon}$ – эффективная деформация.

Так как предельное значение D_f значительно отличается для различных материалов и наиболее точно устанавливается только из экспериментальных показателей, в данной работе определялась область минимальных значений D_f для разных температурно-силовых параметров процесса.

Моделирование напряжений и деформаций

На рис. 6 разными цветами показаны распределения эффективных деформаций по объему чугунных заготовок при выдавливании по различным вариантам. Общим для всех трех рассматриваемых случаев является существование двух зон с повышенными напряжениями. Первая зона расположена в месте контакта заготовки с пуансоном (верхняя часть рисунка). Вторая зона находится в области активной фазы деформирования на участке прохождения металла через штамповую матрицу. За этой зоной на участке устойчивого течения во всех трех случаях (нижняя часть рисунка) происходит уменьшение величины напряжений и их релаксация. По окончании процесса выдавливания значения остаточных напряжений составляют во всех трех случаях около 15–25 МПа.

Интересными с точки зрения изучения изменения свойств по сечению втулок являются распределения интенсивных деформаций (так называемых деформаций по Мизесу). Эти деформации рассчитывали для каждой из трех рассматриваемых схем деформирования с учетом конкретных значений геометрических размеров будущих деталей (втулок машиностроительного назначения с различной толщиной

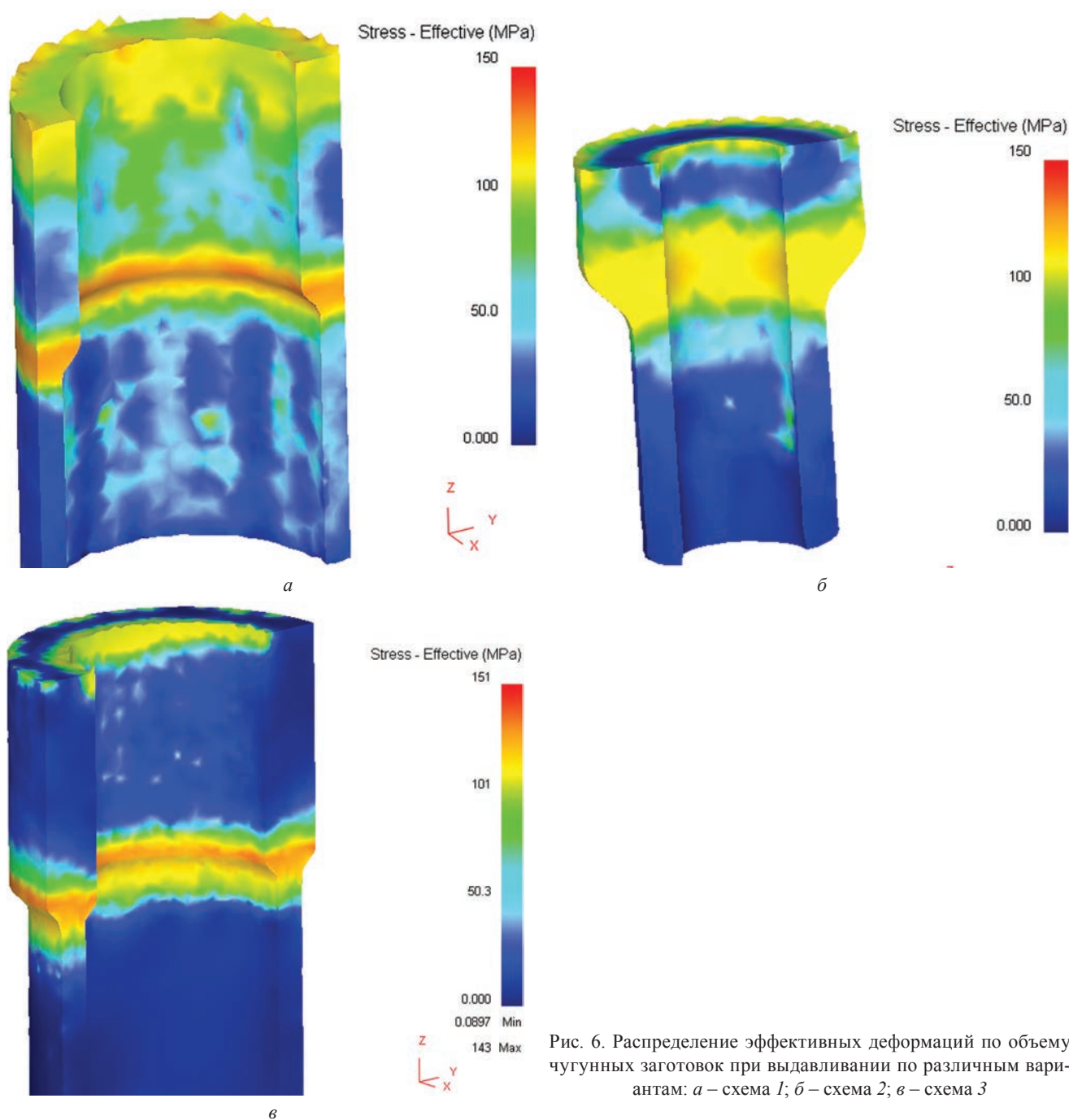


Рис. 6. Распределение эффективных деформаций по объему чугунных заготовок при выдавливании по различным вариантам: а – схема 1; б – схема 2; в – схема 3

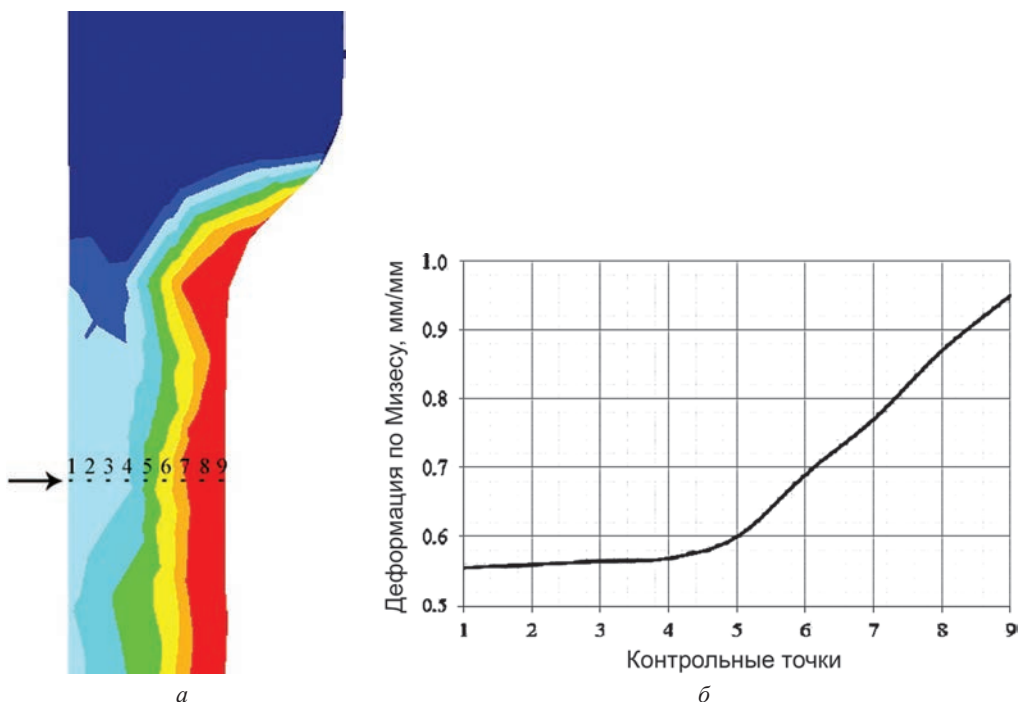


Рис. 7. Изменение деформаций (по Мизесу) по сечению втулки после прессования по схеме 1 (максимальная деформация на внутренней поверхности): *a* – положение контрольных точек; *б* – изменение значений деформаций по Мизесу по мере увеличения расстояния от наружной образующей поверхности втулки (указана стрелкой) к ее центру. Показана только одна (левая) стенка втулки

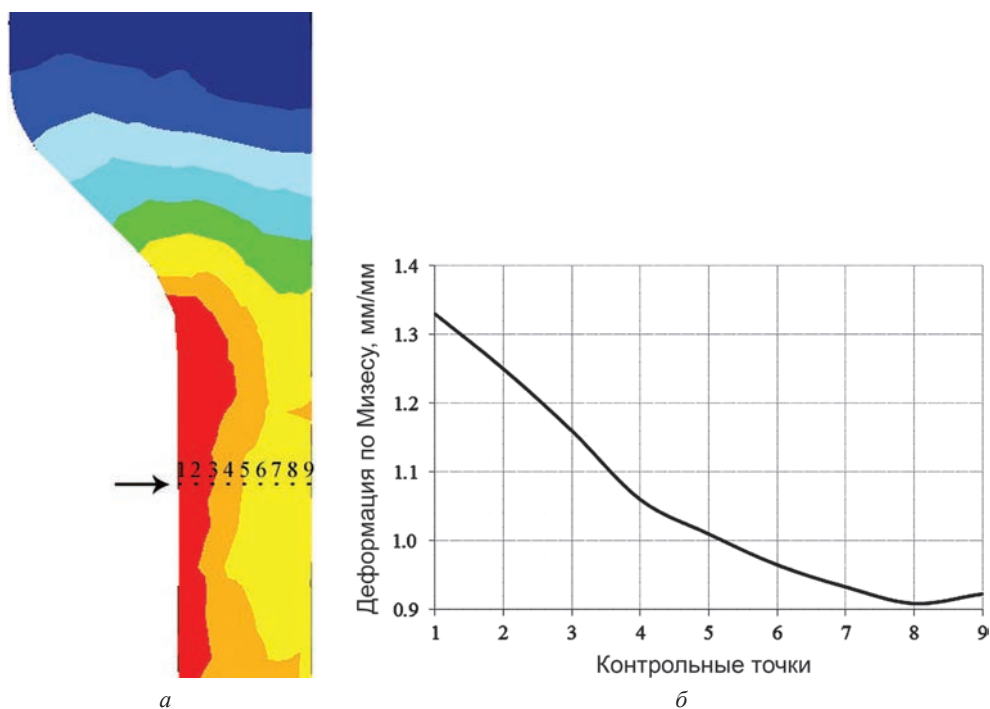


Рис. 8. Изменение деформаций (по Мизесу) по сечению втулки после прессования по схеме 2 (максимальная деформация на внутренней поверхности): *a* – положение контрольных точек; *б* – изменение значений деформаций по Мизесу по мере увеличения расстояния от наружной образующей поверхности втулки (указана стрелкой) к ее центру. Показана только одна (левая) стенка втулки

стенки). На рис. 7–9, *б* представлено изменение деформаций по мере увеличения расстояния от наружной поверхности втулки по направлению внутрь, к ее оси. Для расчетов использовали значения из десяти контрольных точек, равномерно располагающихся по сечению втулки от ее наружного диаметра к внутреннему (рис. 7–9, *a*).

Анализируя рисунки, можно отметить следующую общую закономерность: значения напряжений по Мизесу максимальны в области, прилегающей к деформирующему инструменту (в одних случаях им

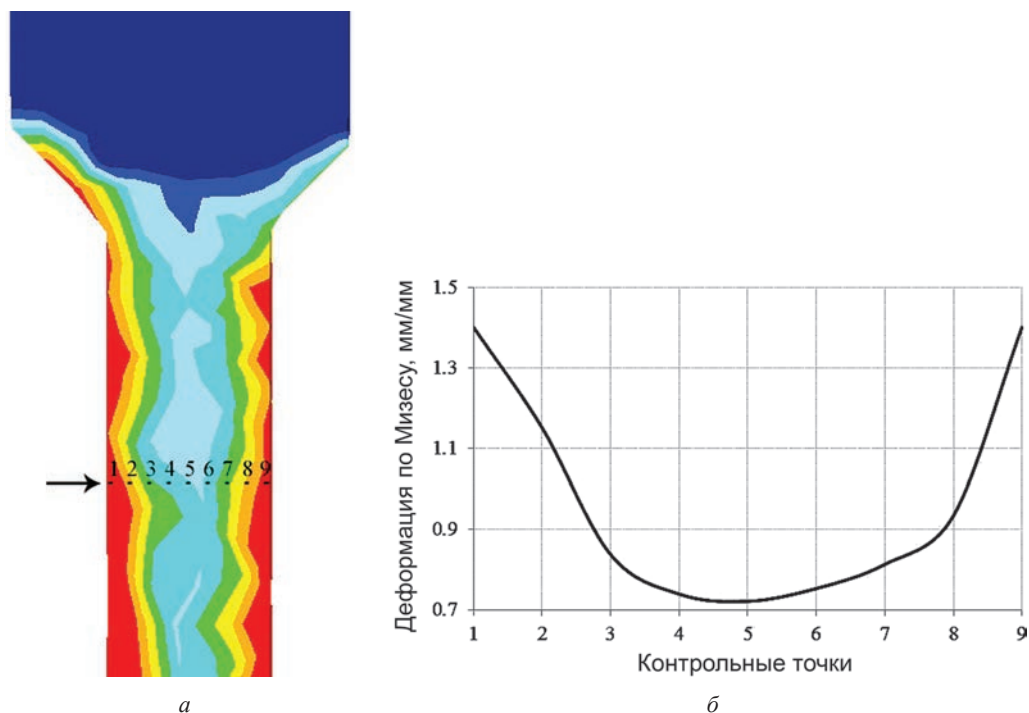


Рис. 9. Изменение деформаций (по Мизесу) по сечению втулки после прессования по схеме 3 (одинаковое обжатие снаружи и внутри): *a* – положение контрольных точек; *б* – изменение значений деформаций по Мизесу по мере увеличения расстояния от наружной образующей поверхности втулки (указана стрелкой) к ее центру. Показана только одна (левая) стенка втулки

является матрица, в других – игла). Однако характер распределения этих напряжений по сечению заготовки в каждой из схем отличается, причем достаточно сильно.

В частности, из рис. 7, *б* видно, что значения деформаций при выдавливании по схеме 1 (см. рис. 4, *a*) практически неизменны на участке от наружной поверхности до сердцевины заготовки, далее они линейно возрастают вплоть до внутренней поверхности заготовки, контактирующей с иглой.

Для случая выдавливании по схеме 2 (рис. 8, *б*) показан характер изменения деформаций. Он такой же, как для схемы 1, но только расположен зеркально; в данном случае максимальные значения напряжений находятся в зоне контакта с матрицей. Следует отметить характерный для схемы 2 более поздний выход показателей напряжения на стабильный уровень значений. Это объясняется, вероятно, изменением геометрических размеров заготовки и не связано со сменой схемы деформации.

При использовании схемы 3 на рис. 9, *б* видно, что самые высокие значения напряжений в деформируемой заготовке находятся на границах с матрицей и иглой. По мере отдаления от этой границы по направлению к центру заготовки даже на 0,5 мм показатели напряжения резко (почти вдвое) снижаются, далее (в середине заготовки) снижаются более плавно. Очевидно, что использование данной схемы позволит получать детали с повышенными механическими характеристиками в поверхностных слоях (в зоне наружного и внутреннего диаметра) и при этом относительно мягкую сердцевину, что будет способствовать повышению усталостной прочности изделия.

Исследование вероятности появления дефектов при выдавливании втулок из чугуна

Предварительно можно отметить, что на возникновение трещин влияет множество различных факторов (температура, скорость деформации, температура подогрева штамповой оснастки, использование противодавления, скорость охлаждения и др.). Наиболее значимым фактором до сих пор считалась температура деформации. Однако первые эксперименты по выдавливанию втулок показали, что для такого рода трубчатых тонкостенных изделий немаловажный фактор – использование противодавления.

В результате численного анализа на основании модели Кокрофта–Латама были получены данные о вероятности возникновения дефектов (под ними понимается появление трещин или полное разрушение) при штамповке втулок. Для того чтобы оценить роль противодавления при одинаковой температуре деформации (950 °С) был выполнен соответствующий расчет. На рис. 10 представлены сравнительные результаты расчета эффективных напряжений при выдавливании втулки по схеме прессования № 1 как без использования противодавления (*a*), так и с противодавлением до 50 МПа (*б*).

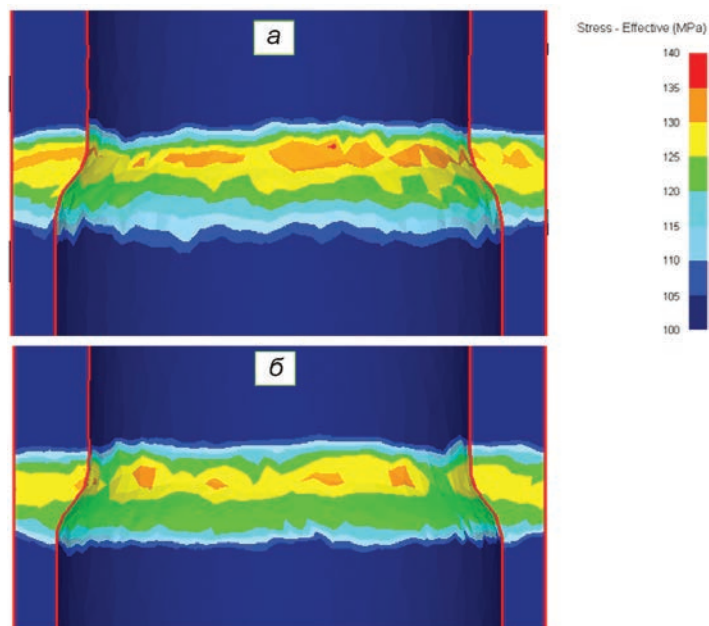


Рис. 10. Распределение эффективных напряжений в чугунных заготовках (температура деформации 950 °С в обоих случаях): *а* – без использования противодействия; *б* – с противодействием до 50 МПа

Как видно из рисунка, значения эффективных напряжений в активной зоне обжатия заготовки при варианте без использования противодействия составляют 105–140 МПа, а в случае использования противодействия они меньше и находятся в интервале значений 115–130 МПа. Такая разница обусловлена перераспределением напряженно-деформированного состояния при изменении температурно-силовых параметров. Важно также и то, что область повышенных (более 105 МПа) напряжений при выдавливании значительно (примерно в 1,5 раза) меньше при варианте использования противодействия, что сужает проблемную зону вероятного трещинообразования.

Таким образом, использование противодействия позволяет снизить уровень эффективных напряжений на 10–15 МПа, что для такого труднодеформируемого материала, как чугун, является весьма значимым показателем.

Построение диаграмм оптимальной деформируемости

Установив наличие еще одного сильно действующего фактора – противодействия, нам представлялось целесообразным, объединив его с таким же сильным фактором – температурой деформации, построить поля напряжений, по которым можно определить оптимальные параметры деформации. По двум осям абсцисс показаны значения противодействия и температуры, а по вертикали – вероятность образования трещин. Для этого была проведена еще одна серия вычислительных экспериментов процесса выдавливания втулок с наиболее низкой вероятностью трещинообразования.

На рис. 11 представлены поверхностные диаграммы зависимостей вероятности образования трещин на втулках от температуры и значений противодействия в исследуемых интервалах. Следует отметить, что для повышения достоверности анализа нами использовались для построения диаграммы наибольшие значения вероятности трещинообразования, полученные по сечению образцов, т. е. на рисунке приведен, если так можно выразиться, «наиболее худший сценарий» развития трещинообразования; на практике ситуация может оказаться более благоприятной.

Как видно из рис. 11, *а, б*, при использовании схем прессования 1 и 2 наблюдается схожий характер изменения вероятности возникновения трещин при изменении температурно-силовых параметров. На основании этих диаграмм можно рекомендовать конкретные оптимальные параметры штамповки данных деталей: температура – 940–1000 °С и обязательное использование противодействия величиной от 20 до 60 МПа.

При использовании прессования по схеме 3 (см. рис. 4, *в*) оптимальный интервал параметров процесса значительно уже по причине больших значений относительной степени деформации получаемых втулок и составляет: температура – 960–980 °С и обязательное использование противодействия 15–40 МПа.

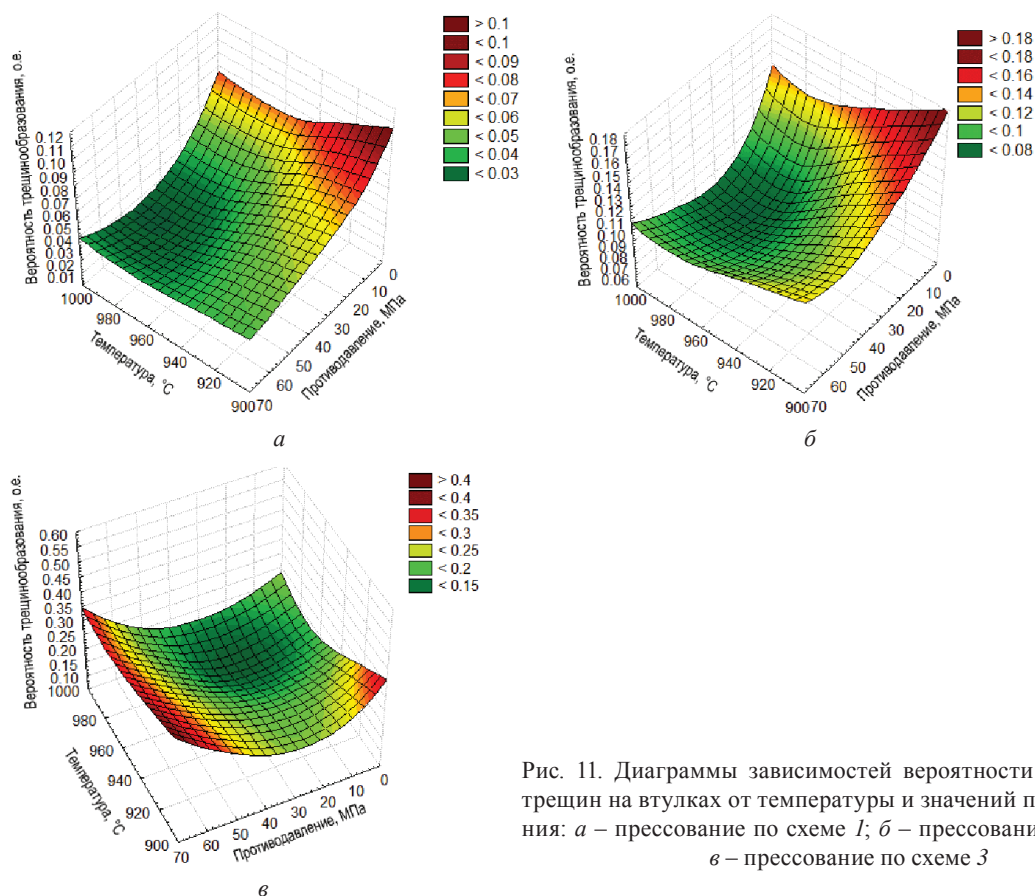


Рис. 11. Диаграммы зависимостей вероятности образования трещин на втулках от температуры и значений противодавления: *а* – прессование по схеме 1; *б* – прессование по схеме 2; *в* – прессование по схеме 3

Практическое использование результатов моделирования

Полученные результаты использованы при изготовлении реальных изделий из чугуна типа втулок различного машиностроительного назначения (детали трансмиссии пассажирских автобусов, посевных агрегатов сельхозтехники): втулки ступицы педали сцепления и тормоза (детали № 6956–1602012, 52565–1602072) пассажирского автобуса «Неман» производства УП «Опытный завод «Неман» (г. Лида), втулки оси сочленения посевного агрегата сеялок марок СПУ-6, СПР-10 производства ОАО «Лидагропромаш» (деталь № D16,05/20x10), заготовки для изготовления поршневых колец двигателя Минского моторного завода (деталь № 47911131715).

Результаты компьютерного моделирования использованы при разработке в ФТИ НАН Беларуси конструкторской документации на штамп для горячего выдавливания заготовок ступицы педали сцепления из высокопрочного чугуна.

На основании полученных результатов в ФТИ НАН Беларуси разработаны, согласованы с ОАО «Минский завод колесных тягачей» и зарегистрированы Государственным комитетом по стандартизации Республики Беларусь технические условия ВУ 100185302.214 «Заготовки для уплотнительных колец из деформированного высокопрочного чугуна».

Выполнен хозяйственный договор с УП «Опытный завод «Неман»: «Определить оптимальную структуру деформированного высокопрочного чугуна и изготовить из него опытную партию деталей». Проведена поставка штампованных втулок из высокопрочного чугуна на пассажирские автобусы марки «Неман». Согласно актам испытаний, автобусы с втулками из деформированного чугуна на сегодняшний день имеют пробег более 300 тыс. км и продолжают эксплуатироваться без рекламаций.

Выводы

1. При получении штамповкой втулок машиностроительного назначения из высокопрочного чугуна рассмотрены три различные схемы их горячей деформации. Все они основаны на выдавливании из толстостенной заготовки типа втулки более тонкостенной втулки (трубы). Особенности штампового инструмента при этих схемах является использование трубчатого пуансона и центрирующей иглы. В зависимости от применяемой схемы в процессе выдавливания происходит либо обжатие заготовки по на-

ружному диаметру, либо увеличение (раздача) отверстия, либо равномерное утонение стенок как снаружи, так и внутри.

2. Показано, что в случае использования в качестве материала чугуна, содержащего в структуре графитные включения, они вытягиваются и (в зависимости от схемы деформации) распределяются по сечению особым образом: либо равномерно, либо неравномерно (с градиентом деформации).

3. Рассматриваемые схемы обжатия целенаправленно использовались для получения градиента распределения графитных включений по сечению. В одном случае схема обеспечивала наличия максимума графитных включений на наружной образующей поверхности втулки, в другом – на внутренней.

4. С использованием имитационного моделирования процесса горячего выдавливания втулок из высокопрочного чугуна выполнена количественная оценка важнейших факторов, определяющих успешное получение качественных деталей. В частности, проведена оценка вероятности образования трещин (модель Кокрофта–Латама), напряжений, деформаций, их изменения в процессе штамповки, а также построены диаграммы оптимальной деформируемости.

5. Установлено, что значения напряжений по Мизесу максимальны в области, прилегающей к деформирующему инструменту (в одних случаях им является матрица, в других – игла). По мере отдаления от этой зоны напряжения снижаются, однако характер распределения этих напряжений по сечению заготовки в каждой из схем достаточно сильно отличается.

6. Каждая из схем деформации является оптимальной только для конкретных условий эксплуатации. Однако наиболее универсальной является схема 3, использование которой позволит получать детали с повышенными механическими характеристиками в поверхностных слоях (вблизи наружной и внутренней поверхности) и при этом относительно мягкой сердцевиной, что будет способствовать повышению усталостной прочности изделия.

7. Показана необходимость использования противодействия при выдавливании изделий типа втулок из чугуна. Это позволяет снизить уровень эффективных напряжений, что весьма важно для такого труднодеформируемого материала, как чугун.

8. Полученные результаты использованы при изготовлении реальных изделий из чугуна типа втулок различного машиностроительного назначения (детали трансмиссии пассажирских автобусов, посевных агрегатов сельхозтехники): втулки ступицы педали сцепления и тормоза (детали № 6956–1602012, 52565–1602072) пассажирского автобуса «Неман» производства УП «Опытный завод «Неман»» (г. Лида), втулки оси сочленения посевного агрегата сеялок марок СПУ-6, СПР-10 производства ОАО «Лидагропромаш» (деталь № D16,05/20x10), заготовки для изготовления поршневых колец двигателя Минского моторного завода (деталь № 47911131715).

9. Результаты компьютерного моделирования использованы при разработке конструкторской документации на штамп для выдавливания заготовок ступицы педали сцепления. На основании полученных результатов разработаны, согласованы с ОАО «Минский завод колесных тягачей» и зарегистрированы Государственным комитетом по стандартизации Республики Беларусь технические условия ВУ 100185302.214 «Заготовки для уплотнительных колец из деформированного высокопрочного чугуна». Разработчики ТУ: Л. Р. Дудецкая, А. И. Покровский, И. Н. Хроль (ФТИ НАН Беларуси). Выполнен хозяйственный договор с УП «Опытный завод «Неман». Проведена поставка штампованных втулок из высокопрочного чугуна на пассажирские автобусы марки «Неман». Согласно актам испытаний, автобусы с втулками из деформированного чугуна на сегодняшний день имеют пробег более 300 тыс. км и продолжают эксплуатироваться без рекламаций.

10. Полученные результаты численного моделирования процесса выдавливания чугунных втулок подтверждают высокую эффективность предварительного компьютерного анализа перед разработкой технологии изготовления нового типа изделия. Сходимость полученных результатов моделирования с фактическими данными хорошая.

Литература

1. Г у б к и н С. И. Теория течения металлического вещества. М.; Л.: ОНТИ, 1935. 91с.
2. С е в е р д е н к о В. П. Теория обработки металлов давлением. Мн.: Выш. шк., 1966. 224 с.
3. С е в е р д е н к о В. П., М у р а с В. С., С у х о д р е в Э. Ш. Горячее гидродинамическое выдавливание режущего инструмента. Мн.: Наука и техника, 1974. 256 с.
4. А н т о н и ш и н Ю. Т. Пластическая деформация чугуна. Мн.: Наука и техника, 1991. 119 с.
5. Д у д е ц к а я Л. Р., П о к р о в с к и й А. И. Исследование прочности и пластичности чугунов в горячем состоянии // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2000. № 4. С. 51–55.

6. Покровский А. И., Ласковнев А. П. Исследование пластичности и технологической деформируемости чугуна // Перспективные материалы и технологии / Под ред. В. В. Клубовича. Витебск: ВГТУ, 2013. С. 566–586.
7. Покровский А. И. Горячая пластическая деформация чугуна: структура, свойства, технологические основы. Мн.: Беларуская навука, 2010. 256 с.
8. Покровский А. И. Пластическое течение включений цементита и графита при обработке давлением чугуна // Литье и металлургия. 2013. № 1 (69). С. 88–95.
9. Покровский А. И., Лушчик П. Е. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния и особенности структурообразования чугуна при горячем выдавливании // Литье и металлургия. 2014. № 4 (77). С. 33–43.
10. Способ изготовления поршневых колец: пат. 4741 Респ. Беларусь от 18.06.2002 по заявке 970621 от 18.11.1997 / Л. Р. Дудецкая, И. К. Данильчик, А. И. Покровский.
11. Способ изготовления подшипника скольжения: пат. 16220 Респ. Беларусь от 11.05.2012 по заявке a20100846 от 31.05.2012 / А. И. Покровский, И. Н. Хроль.
12. Пригоровский Н. И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений: Справ. М.: Машиностроение, 1983. 248 с.
13. Abdellah, Mohammed Y., Mohamed K. Hassan and HM Abu El-Ainin. Plasticity and formability controlling of cast iron using thermo-mechanical treatment // American Journal of Materials Engineering and Technology. 2014. Vol. 2. No. 3. P. 38–42.
14. Qi, Kai et al. Research on the hot deformation behavior and graphite morphology of spheroidal graphite cast iron at high strain rate // Materials & Design. 2009. Vol. 30. No. 10. P. 4511–4515.
15. Yong, Xue et al. Study on critical damage factor and phenomenological constitutive model including dynamic recrystallization softening of AZ80 magnesium alloy // Rare Metal Materials and Engineering. 2012. Vol. 41. P. 250–253.

References

1. Gubkin S. I. *Teoriya techeniya metallichesкого veschestva* [The theory of flow of metals]. Moscow–Leningrad, ONTI Publ., 1935, 91 p.
2. Severdenko V. P. *Teoriya obrabotki metallov davleniem* [Theory of Metal Forming]. Minsk, Vysheyshaya shkola Publ., 1966. 224 p.
3. Severdenko V. P., Muras V. S., Suhodrev E. Sh. *Goryachee gidrodinamicheskoye vydavlivanie rezhushego instrumenta* [Hot hydrodynamic extrusion of cutting tools]. Minsk, Nauka i tehnika Publ., 1974. 256 p.
4. Antonishin Yu. T. *Plasticheskaya deformatsiya chuguna* [Plastic deformation of cast iron]. Minsk, Navuka i tehnika Publ., 1991. 119 p.
5. Dudetskaya L. R., Pokrovskiy A. I. *Issledovanie prochnosti i plastichnosti chugunov v goryachem sostoyanii* [Investigation of strength and ductility of cast iron in the hot condition]. *Vesti NAN Belarus. Seriya fiz.-tehn. nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, ser. Physical and Technical Sciences*, 2000, no. 4, pp. 51–55.
6. Pokrovskiy A. I., Laskovnev A. P. *Issledovanie plastichnosti i tehnologicheskoy deformiruemosti chuguna / Razdel v kollekt. monografii «Perspektivnyye materialy i tehnologii» (glava 27)*. Pod red. V. V. Klubovicha [Study of plasticity and technological deformability of cast iron. Collective monograph «Advanced Materials and Technologies» (chapter 27). Ed. By V. V. Klubovich]. Vitebsk, VGTU Publ., 2013. 655 p.
7. Pokrovskiy A. I. *Goryachaya plasticheskaya deformatsiya chuguna: struktura, svoystva, tehnologicheskoye osnovy* [Hot plastic deformation of iron: structure, properties, technological foundations]. Minsk, Belaruskaja navuka Publ., 2010. 256 p.
8. Pokrovskiy A. I. *Plasticheskoye techenie vklucheniy tsementita i grafita pri obrabotke davleniem chuguna* [Plastic flow of cementite and graphite inclusions in pressure forming of cast iron]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2013, no. 1 (69), pp. 88–95.
9. Pokrovskiy A. I., Luschnik P. E. *Chislennoye modelirovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i osobennosti strukturoobrazovaniya chuguna pri goryachem vydavlivanii* [Numerical simulation of stress-strain state and peculiarities of structure of iron during hot extrusion]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2014, no. 4 (77), pp. 33–43.
10. *Patent Respubliki Belarus' 4741* of 18.06.2002 po zayavke 970621 ot 18.11.1997. Dudetskaya L. R., Danil'chik I. K., Pokrovskiy A. I. *Sposob izgotovleniya porshnevnyh kolets* [A method of manufacturing piston rings]. The patent of Republic of Belarus, no. 4741 of 18.06.2002 on the application of the 970 621 18.11.1997.
11. *Patent Respubliki Belarus' 16220* of 11.05.2012 po zayavke a20100846 ot 31.05.2012. Pokrovskiy A. I., Hrol' I. N. *Sposob izgotovleniya podshipnika skol'zheniya* [A method for producing sliding bearings]. The patent of Republic of Belarus, no. 16220 from 11.05.2012 to 31.05.2012 by a20100846 application.
12. Prigorovskiy N. I. *Metody i sredstva opredeleniya poley deformatsiy i naprjazheniy* [Methods and means for determining the strain and stress fields. A handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983. 248 p.
13. Abdellah, Mohammed Y., Mohamed K. Hassan and HM Abu El-Ainin. Plasticity and formability controlling of cast iron using thermo-mechanical treatment. *American Journal of Materials Engineering and Technology*. 2014, vol. 2, no. 3, pp. 38–42.
14. Qi, Kai et al. Research on the hot deformation behavior and graphite morphology of spheroidal graphite cast iron at high strain rate. *Materials & Design*, 2009, vol. 30, no. 10, pp. 4511–4515.
15. Yong, Xue et al. Study on critical damage factor and phenomenological constitutive model including dynamic recrystallization softening of AZ80 magnesium alloy. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2012, vol. 41, pp. 250–253.