

ПРОТЯЖКА ЗАГотовок С НЕОДНОРОДНЫМ ТЕМПЕРАТУРНЫМ ПОЛЕМ**Заблоцкий В. К., Жбанков Я. Г., Швец А. А., Панов В. В.**

При изготовлении крупных деталей типа валов в качестве заготовки применяются кузнечные слитки. Основной кузнечной операцией для получения таких деталей и устранения дефектов литой структуры слитка является протяжка. Перед ковкой слитки нагревают для повышения пластичности и снижения сопротивления деформированию. В результате охлаждения в процессековки происходит охлаждение заготовки от периферии к центру, что влечет за собой образование изменяющегося во времени неоднородного температурного поля по ее сечению. В данной работе проанализировано распределение деформаций по объему поковки во время ее протяжки с однородным и неоднородным температурными полями, а также дана оценка напряженному состоянию ее осевой зоны. Приведены рекомендации, позволяющие получить минимальную неравномерность распределения деформаций по объему поковки, а также максимально проработанную осевую зону заготовки.

При виготовленні великих деталей типу валів в якості заготовки застосовуються ковальські злитки. Основною ковальською операцією для отримання таких деталей та усунення дефектів литої структури злитку є протяжка. Перед куванням зливки нагрівають для підвищення пластичності і зниження опору деформуванню. У результаті охолодження в процесі кування відбувається охолодження заготовки від периферії до центру, що тягне за собою утворення неоднорідного температурного поля за її перетином. У даній роботі проаналізовано розподіл деформацій за об'ємом поковки під час її протягування з однорідним і неоднорідним температурними полями, а також дана оцінка напруженому стану її осевої зони. Наведено рекомендації, що дозволяють отримати мінімальну нерівномірність розподілу деформацій за об'ємом поковки, а також максимально опрацьовану осьову зону заготовки.

In the manufacture of large parts such as shafts, forging ingots are used as a workpieces. The main forging operation to produce such parts and eliminate the defects of the cast structure of the workpiece is a broaching. Workpiece is heated to improve the ductility and reduced resistance to deformation. As a result of cooling during forging preform is cooled from the periphery to the center, which entails the formation of a time-varying non-uniform temperature distribution over its cross section. In this work the analyze the distribution of deformation in terms of forging during her broach with a uniform and non-uniform temperature fields, as well as an assessment of its axial stress state area were done. The recommendations that allows minimal uneven distribution of deformation in terms of forgings, as well as the most-developed axial zone of the workpiece also were given.

Заблоцкий В. К.

д-р техн. наук, проф., зав. каф. ТОЛП ДГМА

Жбанков Я. Г.

канд. техн. наук, ст. преп. каф. ОМД ДГМА

yzhbankov@gmail.com

Швец А. А.

аспирант ДГМА

Панов В. В.

начальник КПЦ ПАО «ЭМСС»

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

ПАО «ЭМСС» – Публичное акционерное общество «Энергомашспецсталь» г. Краматорск.

УДК 621.73.042

Заблоцкий В. К., Жбанков Я. Г., Швец А. А., Панов В. В.

ПРОТЯЖКА ЗАГОТОВОК С НЕОДНОРОДНЫМ ТЕМПЕРАТУРНЫМ ПОЛЕМ

Ввиду высокой конкуренции на рынке тяжелого машиностроения в настоящее время все больше уделяют внимание качеству изготавливаемой продукции. При производстве крупных деталей типа валов в качестве заготовки используют кузнечный слиток, который в свою очередь имеет ряд недостатков в виде химической и структурной ликваций, а также наличия пор. Основной операцией получения таких деталей является ковка, а именно протяжка [1, 2]. Существует множество способов устранения дефектов литейного происхождения на основе применения специальных технологийковки. Например, существуют способы, в которых используют заготовку с предварительным ее профилированием специальным инструментом [3, 4]. Как правило, для осуществления таких технологий необходимо использование специального инструмента, которого может не быть в инструментальном парке конкретного предприятия, а его изготовление повлечет за собой большие затраты.

В процессековки происходит охлаждение заготовки. Особенно интенсивно охлаждаются зоны контакта поковки с инструментом. Центральная зона, в свою очередь, также охлаждается, однако со значительно меньшей скоростью. Перепад температуры приводит к неравномерным по сечению механическим свойствам, что влияет на напряженно-деформированное состояние заготовки в процессе протяжки [5, 6].

Целью данной работы является разработка эффективных режимов протяжки обычным кузнечным инструментом заготовки с неоднородным температурным полем, позволяющих обеспечить низкую неравномерность деформации в ее объеме и, как следствие, высокое качество изделия.

В данной работе был исследован процесс протяжки цилиндрической заготовки из стали 35 в однородном температурном поле (1200 °С) и с охлаждением во времяковки плоскими бойками до температур поверхности 1000 °С, 900 °С, 800 °С с различной величиной обжатия ($\varepsilon_h = \Delta D / D_0$, ΔD – величина абсолютного обжатия) $\varepsilon_h = 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3$ и различной относительной подачей ($\bar{f} = f / D_0$) $\bar{f} = 0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1,1$. Проведено моделирование схем протяжки, в ходе которых обеспечивалось минимум 3 нажима бойком на заготовку для учета влияния ее жестких недеформированных концов на ее напряженно-деформированное состояние. Моделирование процесса протяжки проводилось в программе, которая основана на методе конечных элементов. В качестве заготовки был принят цилиндр диаметром 1000 мм и длиной 3000 мм из материала Сталь 35. Протяжка производилась при начальной температуре заготовки 1200 °С (однородное температурное поле), а также после ее охлаждения во времяковки до температур поверхности 1000 °С, 900 °С и 800 °С (неоднородное температурное поле) плоскими бойками шириной $B = 1200$ мм и радиусом скругления кромки рабочей поверхности 100 мм. Заготовка разбивалась на 50000 элементов, скорость деформирования 25 мм / с. При моделировании коэффициент пластического трения Зибеля принимался равным 0,35. В ходе моделирования исследовано влияние величины относительного обжатия, относительной подачи и температурного поля заготовки на распределение интенсивности логарифмических деформаций по ее объему, а также на величину показателя жесткости схемы напряженного состояния.

Проведено исследование влияния размеров заготовки на распределение температуры по ее сечению при охлаждении. Построены графики распределения температуры для наиболее распространенных в ковке размеров сечений $D = 750-1500$ мм в различный момент охлаждения заготовки, а именно при температуре поверхности 1000 °С, 900 °С, 800 °С (рис. 1).

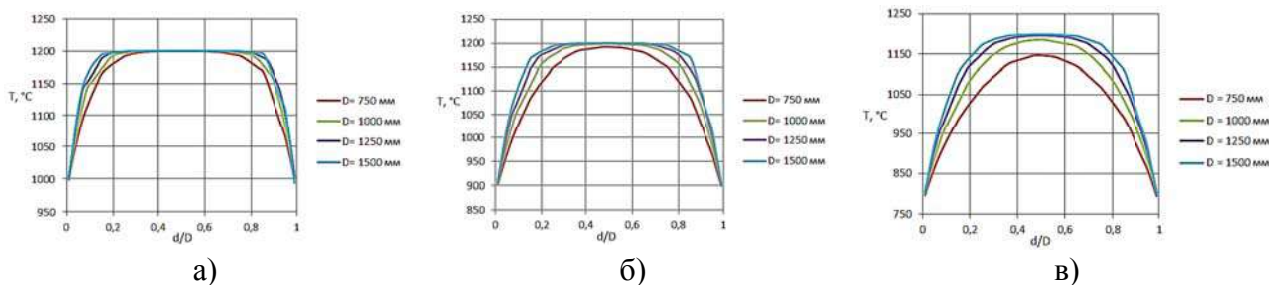


Рис. 1. График распределения температуры для различных сечений слитка при температуре поверхности 1000 °С (а), 900 °С (б) и 800 °С (в)

Анализ кривых на графике (рис. 1) позволяет сделать вывод о том, что разница между данными температурными полями незначительна. Таким образом, можно считать, что перепад температур по сечению заготовки для диаметров 750–1500 мм отличается незначительно.

Для определения адекватности полученных данных проведено сравнение известных экспериментальных данных [7] по охлаждению на воздухе кузнечного слитка из стали 35 весом 10 тонн. В результате сравнения можно утверждать, что моделируемое температурное поле по сечению заготовки в интервале ковочных температур 800–1200 °С схоже с экспериментальным (рис. 2). Расхождение результатов моделирования и экспериментальных данных находится в пределах 10 %, что не приведет к существенным погрешностям.

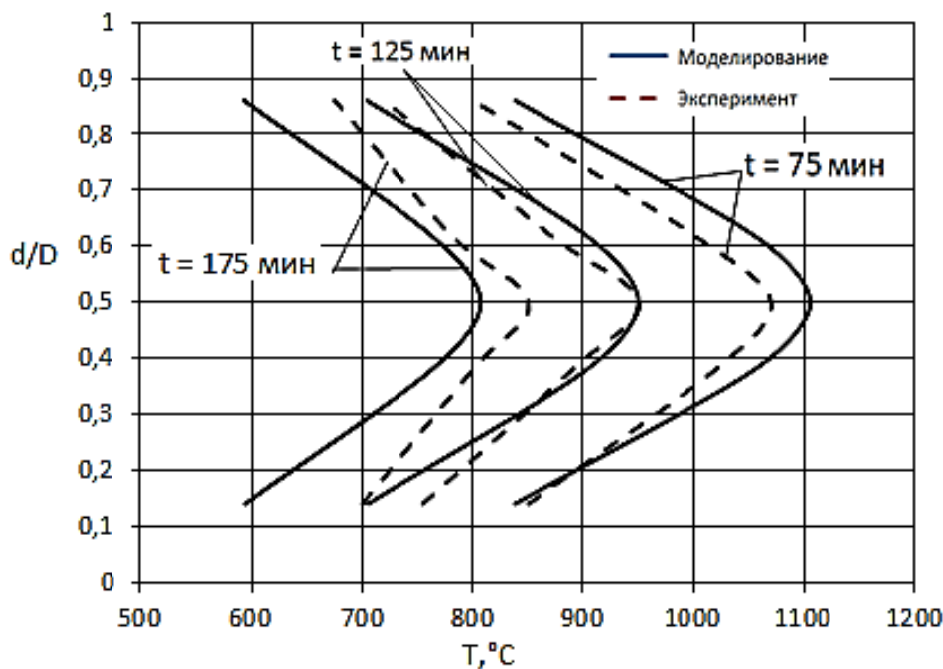


Рис. 2. График распределения температур по сечению слитка из стали 35 весом 10 т в разный момент времени (t)

Полученные поля распределения температур накладывали на заготовку и моделировали ее протяжку плоскими бойками.

По результатам исследования были построены графики распределения интенсивности логарифмических деформаций по поперечному сечению заготовки (рис. 3, сечение Б–Б) в зависимости от разных величин обжатия и относительных подач при протяжке заготовки с однородным и неоднородным температурным полем с температурой поверхности 1000 °С, 900 °С, 800 °С (рис. 4).

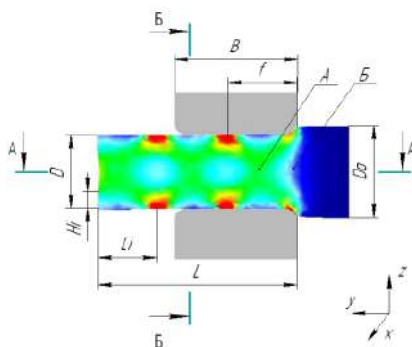


Рис. 3. Схема протяжки заготовки плоскими бойками

Анализ полученных данных позволил установить, что при протяжке заготовки плоскими бойками в однородном температурном поле с относительной подачей $\bar{f} = 0,3$ и величиной обжатия $\varepsilon_h = 0,05-0,1$ (рис. 4, столбец 1, пунктир) наблюдается низкая неравномерность распределения интенсивности логарифмических деформаций, что объясняется слабой проработкой периферийных слоев заготовки, а также наличием непроработанной осевой зоны. При увеличении величины обжатия (до $\varepsilon_h = 0,3$) наружные слои заготовки прорабатываются более интенсивно, однако осевая зона остается слабо проработанной, что приводит к увеличению неравномерности распределения интенсивности логарифмических деформаций от 0,125 (при $\varepsilon_h = 0,05$) до 0,75 (при $\varepsilon_h = 0,3$).

После охлаждения поверхности заготовки до 1000 °С при ее протяжке с относительной подачей $\bar{f} = 0,3$ и величиной обжатия $\varepsilon_h = 0,05-0,1$ также наблюдается низкая неравномерность распределения интенсивности логарифмических деформаций, однако с увеличением величины обжатия до $\varepsilon_h = 0,3$ наблюдается более интенсивная проработка внутренних слоев вследствие повышения сопротивления деформированию наружных за счет охлаждения. При этом неравномерность распределения интенсивности логарифмических деформаций уменьшается по сравнению с протяжкой заготовки с однородным температурным полем и составляет 0,094 (при $\varepsilon_h = 0,05$) и 0,19 (при $\varepsilon_h = 0,3$) (рис. 4, в, строка 1).

При охлаждении заготовки еще на 100 °С проработка периферийных слоев остается на прежнем уровне за счет увеличения их сопротивления деформированию. Происходит деформирование осевой зоны заготовки поверхностными более жесткими слоями. При этом неравномерность распределения интенсивности логарифмических деформаций уменьшается и составляет 0,07 (при $\varepsilon_h = 0,05$) и 0,12 (при $\varepsilon_h = 0,3$) (рис. 4, б, строка 1).

После охлаждения поверхности заготовки до 800 °С при величине обжатия $\varepsilon_h = 0,1-0,3$ сохраняется проработка лишь осевой зоны заготовки. Неравномерность распределения интенсивности логарифмических деформаций уменьшается и составляет 0,067 (при $\varepsilon_h = 0,05$) и 0,1 (при $\varepsilon_h = 0,3$) (рис. 4, в, столбец 1).

Также следует отметить, что при величине обжатия $\varepsilon_h = 0,05-0,1$ и различных подачах $\bar{f} = 0,3-1,1$ неравномерность распределения интенсивности логарифмических деформаций практически одинакова и характеризуется наличием непроработанной осевой зоны (рис. 4) при всех исследуемых температурных полях.

При протяжке заготовки с величиной относительных подач от 0,5 до 1,1 и степени обжатия $\varepsilon_h = 0,05-0,15$ с однородным и неоднородным температурными полями наблюдается уменьшение неравномерности распределения интенсивности логарифмических деформаций по ее сечению за счет его слабой проработки (рис. 4).

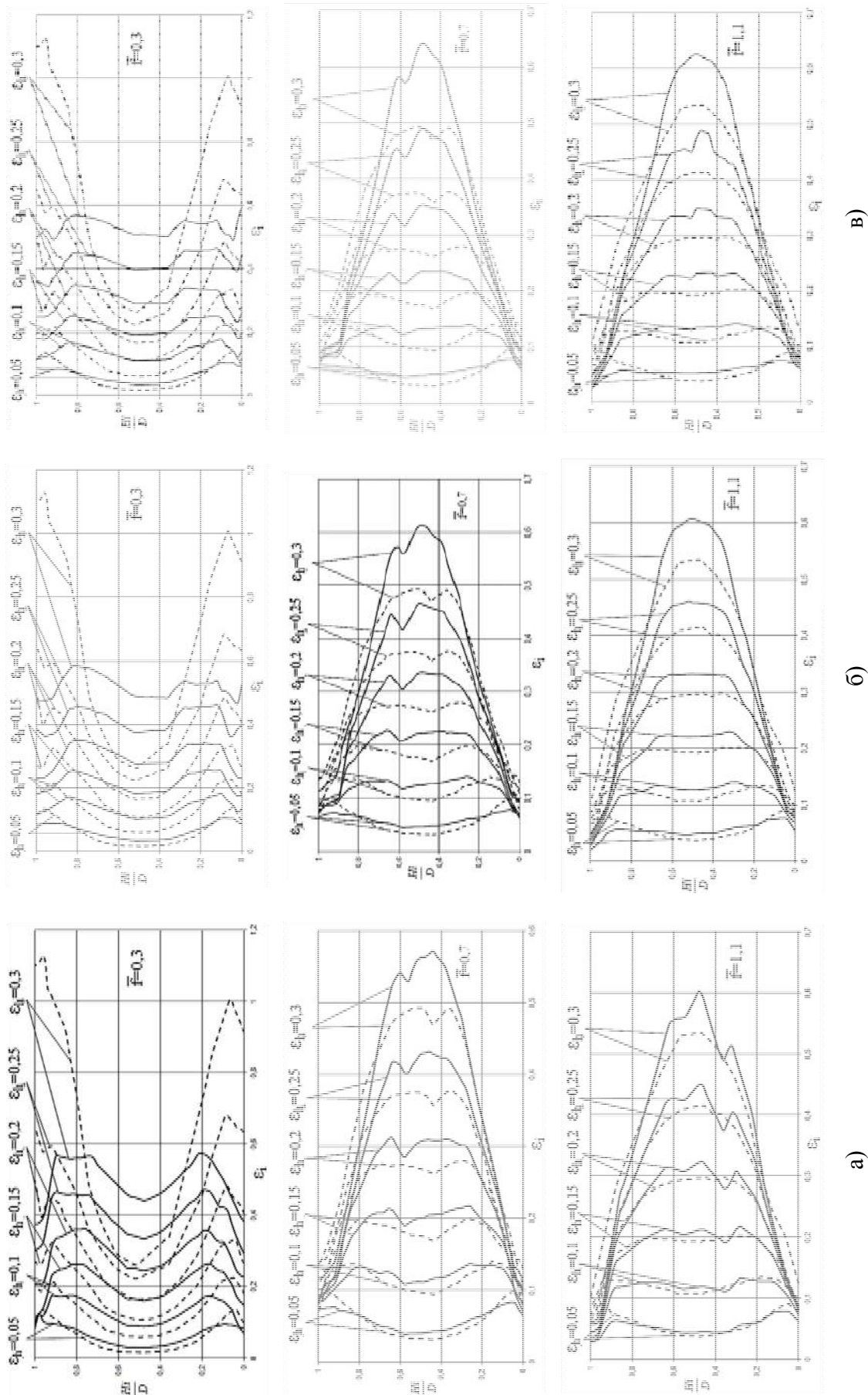


Рис. 4. График распределения интенсивности логарифмических деформаций по сечению заготовки B-B в зависимости от разных величин обжатия и относительных подал при протяжке с однородным температурным полем (пунктир) и с охлаждением в процессековки до 1000 °С (а), 900 °С (б) и 800 °С (в)

При протяжке заготовки с однородным температурным полем с увеличением степени обжатия от 0,15 до 0,3 происходит более интенсивная проработка осевой зоны заготовки. Однако неравномерность распределения интенсивности логарифмических деформаций возрастает за счет образования застойной зоны под рабочей поверхностью деформирующего бойка и увеличения проработки лишь осевой зоны. Она составляет 0,073 (при $\varepsilon_h = 0,05$) и 0,27 (при $\varepsilon_h = 0,3$) при величине относительной подачи $\bar{f} = 0,5$, а также 0,05 (с $\varepsilon_h = 0,05$) и 0,43 (с $\varepsilon_h = 0,3$) при величине относительной подачи $\bar{f} = 1,1$ (рис. 4, строки 2–3, пунктир).

При охлаждении поверхности заготовки до 100 °С сохраняется увеличение деформирования лишь центральной зоны заготовки, что приводит к еще большей неравномерности распределения интенсивности логарифмических деформаций, которая составляет 0,07 (при $\varepsilon_h = 0,05$) и 0,39 (при $\varepsilon_h = 0,3$) при величине относительной подачи $\bar{f} = 0,5$, а также 0,048 (с $\varepsilon_h = 0,05$) и 0,54 (с $\varepsilon_h = 0,3$) при величине относительной подачи $\bar{f} = 1,1$ (рис. 4, а, строки 2–3).

При охлаждении заготовки еще на 100 °С характер кривых на графиках сохраняется. Неравномерность распределения интенсивности логарифмических деформаций уменьшается на 0,034 (при $\varepsilon_h = 0,05$) и увеличивается на 0,04 (при $\varepsilon_h = 0,3$) при величине относительной подачи $\bar{f} = 0,5$, а также уменьшается на 0,001 (при $\varepsilon_h = 0,05$) и увеличивается на 0,2 (при $\varepsilon_h = 0,3$) при величине относительной подачи $\bar{f} = 1,1$ (рис. 4, б, строки 2–3).

С уменьшением температуры поверхности заготовки до 800 °С неравномерность распределения интенсивности логарифмических деформаций при $\varepsilon_h = 0,05$ уменьшается до 0,034 с величиной относительной подачи $\bar{f} = 0,5$, что в 2 раза меньше, чем при протяжке заготовки с однородным температурным полем и увеличивается до 0,467 при $\varepsilon_h = 0,3$ и $\bar{f} = 1,1$, что говорит о интенсивной проработке осевой зоны заготовки. Такое большое значение деформации в осевой части заготовки положительно влияет на проработку литой дефектной части металла слитка, способствует залечиванию дефектов в виде пустот металлургического происхождения.

Проведено исследование распределения интенсивности логарифмических деформаций вдоль оси протянутого участка поковки (сечение А–А, рис. 3) в зависимости от изменения величины обжатия и относительной подачи для различных температурных полей заготовки (рис. 5).

Анализ полученных данных позволил установить, что наименьшая неравномерность распределения интенсивности логарифмических деформаций наблюдается в центральной части заготовки. При протяжке заготовки, как с однородным, так и с неоднородным температурными полями при относительной подаче $\bar{f} = 0,3$. Как показали результаты исследования распределения интенсивности логарифмических деформаций по поперечному сечению заготовки, это вызвано низким уровнем проработки осевой зоны заготовки.

При протяжке заготовки с однородным температурным полем с относительной подачей $\bar{f} = 0,5–1,1$ и величиной обжатия $\varepsilon_h = 0,05–0,3$ происходит увеличение неравномерности распределения интенсивности логарифмических деформаций в осевой зоне заготовки от 0,025 при $\bar{f} = 0,5$ и $\varepsilon_h = 0,05$ до 0,346 при $\bar{f} = 1,1$ и $\varepsilon_h = 0,3$. Пики значений интенсивности логарифмических деформаций соответствуют по длине части заготовки, которая при протяжке находится непосредственно под бойком (точка А, рис. 3), а малые значения находятся под краем бойка (точка Б, рис. 3).

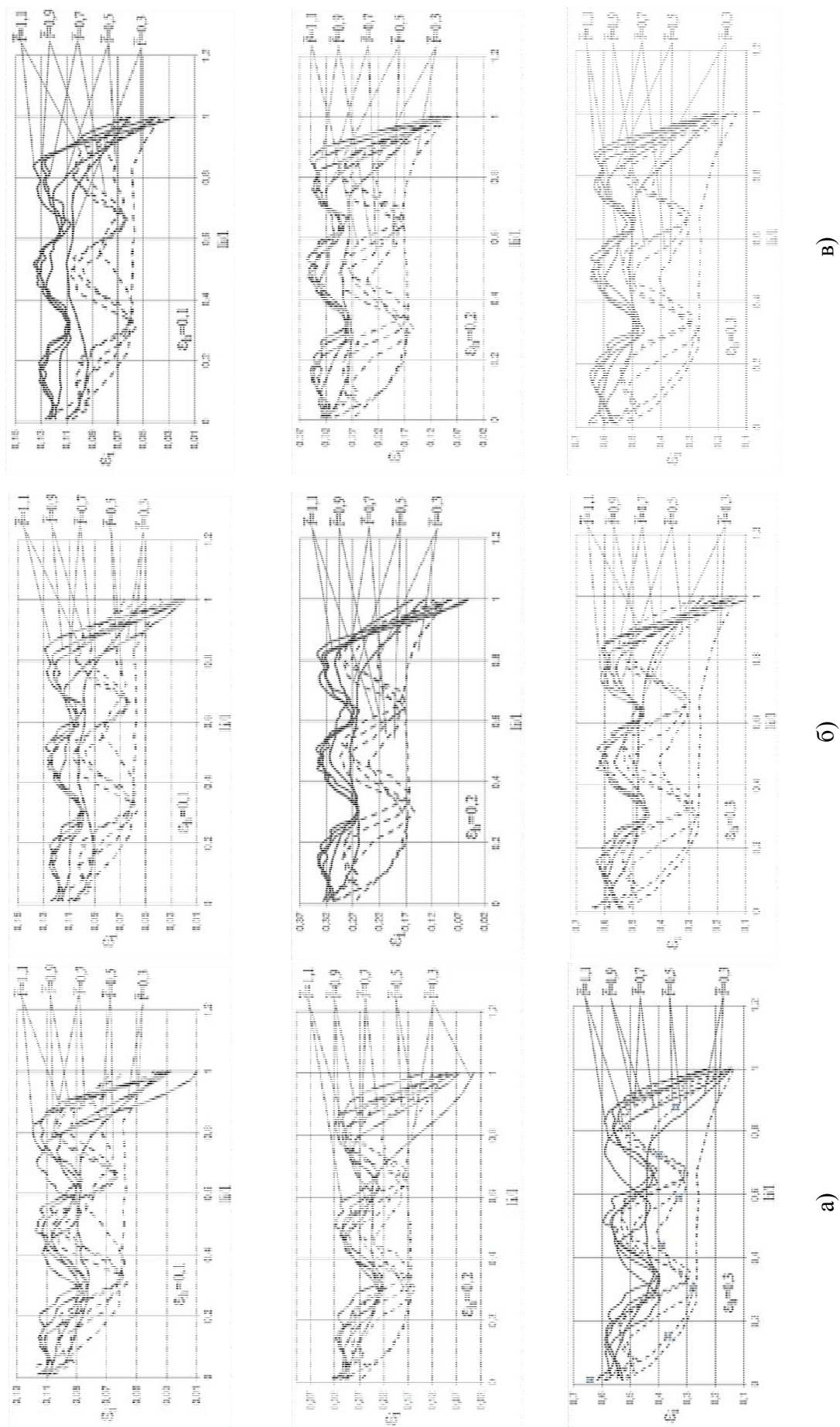


Рис. 5. График распределения интенсивности логарифмических деформаций в осевой зоне по длине заготовки, протянутой с различными относительными подачами и величинами обжатий при протяжке с однородным температурным полем (пунктир) и с охлаждением в процессековки до 1000 °C (а), 900 °C (б) и 800 °C (в)

После охлаждения заготовки до 1000–800 °С неравномерность распределения интенсивности логарифмических деформаций уменьшается до 0,02–0,29 и характеризуется высоким уровнем проработки осевой зоны.

Такое синусоидальное распределение деформации вдоль оси заготовки после протяжки вызывает неоднородность ее механических свойств. Поэтому при последующем проходе необходимо производить протяжку со смещением заготовки на половину ширины бойка, что позволит обеспечить более равномерное распределение интенсивности логарифмических деформаций вдоль оси заготовки. Необходимо также учитывать, что при протяжке заготовки одной и той же длины с различными подачами характер кривых на рис. 5 сохранится, однако неравномерность распределения интенсивности логарифмических деформаций будет меньше для протяжки с малыми подачами. Это приводит к увеличению количества обжатий на участке заготовки той же длины, а, следовательно, и к образованию большего количества пиков кривой под центральной частью деформирующего бойка при каждом обжатии.

Для оценки напряженного состояния заготовки была исследована зависимость величины компонент осевых напряжений для точек *A* и *B* (рис. 3), находящихся на оси заготовки, от термомеханического режима протяжки. Построены графики зависимости компонент осевых напряжений от величины обжатия и относительной подачи при различном температурном поле заготовки (рис. 6). Во всех рассмотренных случаях осевая компонента напряжения σ_z отрицательна, а компоненты σ_x и σ_y принимают в некоторых случаях положительные значения.

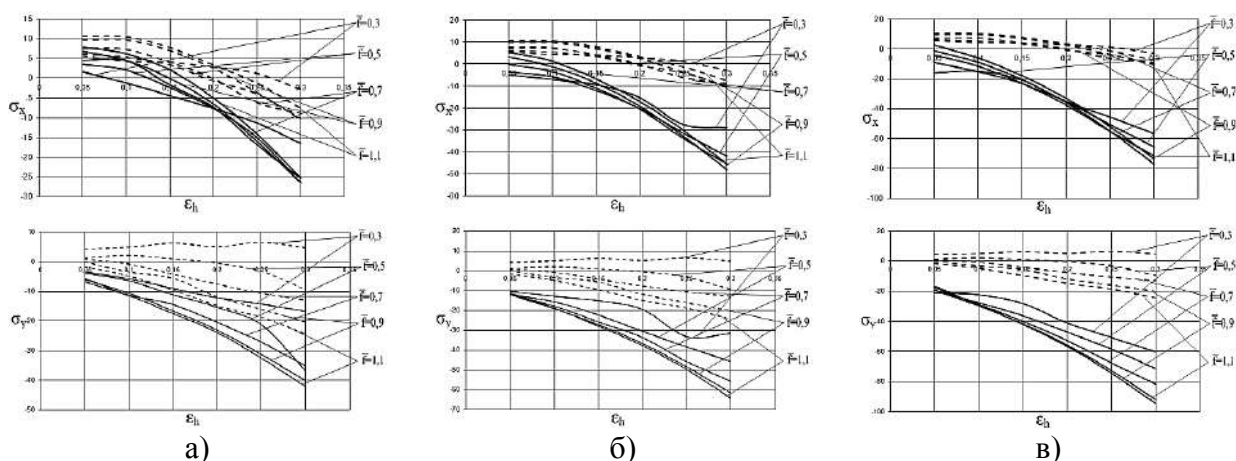


Рис. 6. График зависимости компонент осевых напряжений от величины обжатия и относительной подачи при протяжке плоскими бойками с однородным температурным полем (пунктир) и с охлаждением в процессековки до 1000 °С (а), 900 °С (б) и 800 °С (в)

При протяжке заготовки с однородным температурным полем плоскими бойками с величиной обжатия $\varepsilon_h = 0,05–0,2$ и относительной подачей в диапазоне 0,3–1,1 осевая компонента напряжения σ_x принимает положительные значения до 11 МПа (рис. 6, а). Это объясняется тем, что при больших подачах и малых обжатиях более интенсивное течение металла происходит в поперечном направлении. С увеличением величины обжатия до $\varepsilon_h = 0,3$ осевая компонента напряжения σ_x принимает отрицательные значения до –11 МПа.

При протяжке заготовки плоскими бойками с температурой поверхности 1000 °С положительные значения осевой компоненты напряжения σ_x наблюдаются при величине обжатия $\varepsilon_h = 0,05–0,075$ и относительной подаче $\bar{f} = 0,3$, которые достигают 2 МПа, а также при величине обжатия $\varepsilon_h = 0,125–0,175$ и относительной подаче $\bar{f} = 0,5–1,1$, которые достигают 7,5 МПа (рис. 6, а – б).

При последующем охлаждении заготовки до 900 °С осевая компонента напряжения σ_x принимает положительные значения при $\varepsilon_h = 0,05-0,11$ и $\bar{f} = 0,9-1,1$, которые достигают 4 МПа. При величине обжатия 0,05–0,1 и относительной подаче 0,3–0,7 осевая компонента σ_x принимает отрицательные значения до –5 МПа, а с увеличением величины обжатия до $\varepsilon_h = 0,3$ и относительной подачи до $\bar{f} = 1,1$ – до –29...49 МПа.

С уменьшением температуры поверхности заготовки до 800 °С осевая компонента напряжения σ_x принимает положительные значения лишь при $\varepsilon_h = 0,05-0,7$ при относительной подаче $\bar{f} = 1,1$ и достигает 2,5 МПа. При протяжке заготовки с величиной обжатия $\varepsilon_h = 0,05$ и $\bar{f} = 0,3-0,9$ компонента σ_x принимает отрицательные значения до –18 МПа, а с увеличением величины обжатия до $\varepsilon_h = 0,3$ – до –48...68 МПа.

Что касается напряжения σ_y , то оно принимает положительные значения (~ 5 МПа) при относительной подаче $\bar{f} = 0,3$ и всех значениях обжатия для рассматриваемых условий протяжки (рис. 6, строка 2, пункт). При относительной подаче $\bar{f} = 0,5$ напряжение σ_y положительно в случае протяжки с величины обжатия от 0,05 до 0,2, что в совокупности с положительными значениями компоненты σ_x может привести к образованию внутренних разрывов. С увеличением относительной подачи от 0,7 до 1,1 и величиной обжатия от 0,05 до 0,3 осевая компонента напряжений σ_y принимает отрицательные значения, которые достигают –23 МПа.

После охлаждения заготовки до температуры поверхности 1000 °С при протяжке осевая компонента напряжения σ_y принимает отрицательные значения для всех исследуемых режимов протяжки. Так, при $\varepsilon_h = 0,05$ и $\bar{f} = 0,3-1,1$ она принимает значения от –3,5 до –6,8 МПа, а при увеличении величины обжатия до $\varepsilon_h = 0,3$ – от –16 до –42 МПа.

При достижении температуры поверхности заготовки 900 °С при протяжке осевая компонента напряжения σ_y принимает отрицательные значения, которые достигают –10...–11 МПа при $\varepsilon_h = 0,05$ и $\bar{f} = 0,3-1,1$ и уменьшается с увеличением величины обжатия. Так, при $\varepsilon_h = 0,3$ значения компоненты находятся в интервале от –31 до –64 МПа.

При последующем охлаждении заготовки еще на 100 °С эти значения уменьшаются до –16...–21 МПа при $\varepsilon_h = 0,05$ и $\bar{f} = 0,3-1,1$ и –60...–94 МПа при увеличении величины обжатия до $\varepsilon_h = 0,3$.

На основе полученных данных был рассчитан показатель жесткости схемы напряженного состояния η для точек *A* и *B* (рис. 3) по следующей формуле:

$$\eta = \frac{3 \cdot \sigma_{cp}}{\sigma_i}, \quad (1)$$

где σ_{cp} – среднее напряжение, МПа;

σ_i – интенсивность напряжений, МПа.

Построены зависимости показателя жесткости схемы напряженного состояния от различных условий протяжки (рис. 7).

Анализ кривых на рис. 7 позволил установить, что в точке *A* показатель жесткости схемы напряженного состояния принимает отрицательные значения при любых условиях подачи и обжатий, а также любом температурном поле сечения заготовки, что говорит

о наличии благоприятного напряженного состояния сжатия (рис. 5, строка 1). Так, при относительной подаче $\bar{f} = 0,3$ и величине обжатия $\varepsilon_h = 0,05-0,3$ показатель η принимает значения равные $-0,4 \dots -0,85$, а при относительной подаче $\bar{f} = 0,5-1,1$ – от $-0,5$ до $-1,9$ при протяжке с однородным температурным полем, а также $-0,8 \dots -2,8$ и $-2,3 \dots -6$ соответственно при протяжке с неоднородным температурным полем.

В точке *Б* при протяжке с однородным температурным полем с величиной обжатия $\varepsilon_h = 0,05-0,1$ и относительной подачей $\bar{f} = 1,1$ наблюдается напряженное состояние растяжения (рис. 7, пунктир), что обуславливает возможное появление разрывов в заготовке в данном месте. Как видно из графика, напряженное состояние сжатия в этой точке достигается при относительной подаче $\bar{f} = 0,5-0,9$ при всех значениях величины обжатия для рассмотренных условий протяжки, а также при величине обжатия $\varepsilon_h = 0,1-0,3$ и относительной подаче $\bar{f} = 1,1$ – значений $-0,1 \dots -1,2$ (рис. 7, пунктир).

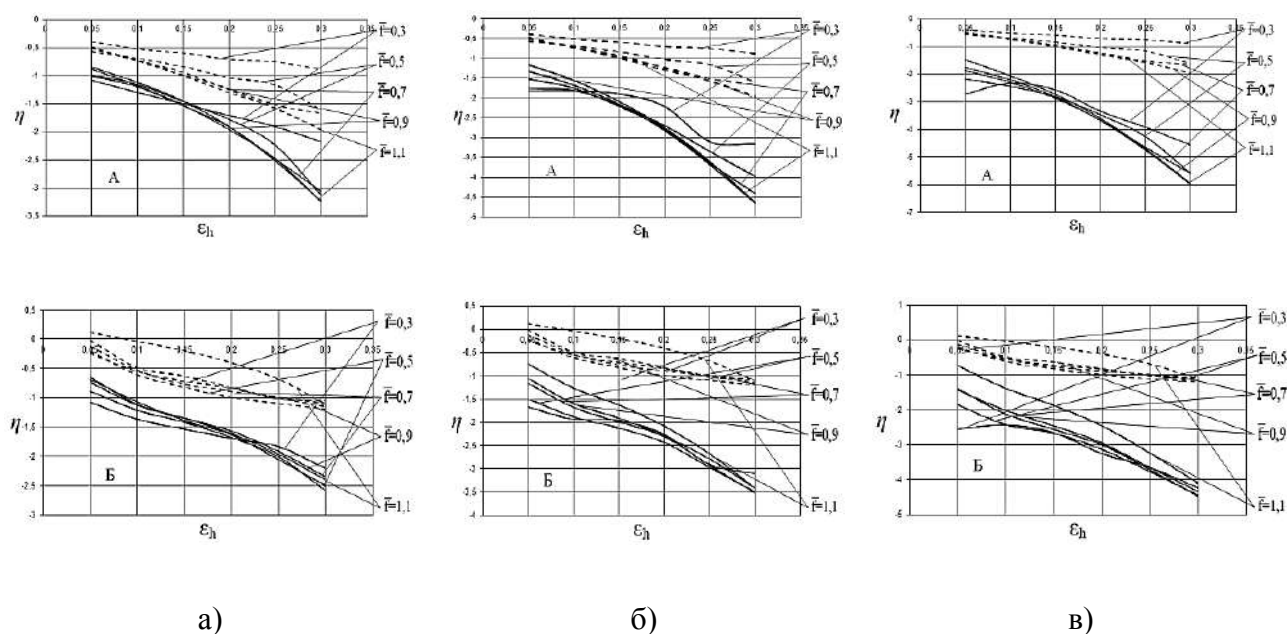


Рис. 7. Графики зависимости показателя жесткости схемы напряженного состояния в осевой зоне слитка от величины обжатия и относительной подачи при протяжке заготовки плоскими бойками с однородным температурным полем (пунктир) и с охлаждением в процессе ковки до 1000 °С (а), 900 °С (б) и 800 °С (в)

При протяжке заготовки с неоднородным температурным полем показатель жесткости схемы напряженного состояния принимает отрицательные значения для всех исследуемых режимов протяжки. Так, при протяжке заготовки с температурой поверхности 1000 °С с величиной обжатия $\varepsilon_h = 0,05$ и относительной подачей $\bar{f} = 0,3-1,1$ он принимает значения в точке *А* равные $-0,8 \dots -1$, а с увеличением величины обжатия до $\varepsilon_h = 0,3 \dots -2,2 \dots -3,2$, а в точке *Б* – до $-0,6 \dots -1$ и $-2,2 \dots -2,4$ соответственно.

После падения температуры поверхности заготовки на 100 °С при протяжке с величиной обжатия $\varepsilon_h = 0,05$ и относительной подачей $\bar{f} = 0,3-1,1$ показатель жесткости схемы

напряженного состояния возрастает в точке A до $-1,2 \dots -1,8$, а с увеличением величины обжатия до $\varepsilon_h = 0,3 \dots -3,2 \dots -4,6$, а в точке B – до $-0,7 \dots -1,7$ и $-3,1 \dots -3,4$ соответственно.

При достижении во время протяжки температура поверхности заготовки 800°C показатель жесткости схемы напряженного состояния в точке A достигает значений $-1,5 \dots -2,7$ МПа при протяжке с величиной обжатия $\varepsilon_h = 0,05$ и относительной подачей $\bar{f} = 0,3-1,1$, после увеличения величины обжатия до $\varepsilon_h = 0,3 - -4,5 \dots -6$ МПа. В точке B этот показатель достигает значений, равных $-0,7 \dots -2,5$ и $-4,1 \dots -4,2$ соответственно.

Таким образом, показатель η в 3 раза больше при протяжке с неоднородным температурным полем, что объясняется наличием более жестких периферийных слоев заготовки, которые непосредственно деформируют центральную часть.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволяют определить оптимальный режим протяжки плоскими бойками с точки зрения проработки осевой дефектной зоны слитка, а также минимальной неоднородности распределения деформаций по объему поковки с учетом падения ее температуры во время протяжки, т. е. изменения температурного поля в процессековки.

Установлено, что для обеспечения благоприятного напряженно-деформированного состояния заготовки протяжку плоскими бойками рекомендуется проводить на первом этапе, т. е. при наличии однородного температурного поля заготовки с относительной подачей от 0,5 до 1,1 и величиной обжатия равной 0,1–0,2. После падения температуры поверхности заготовки в процессековки до 1000°C следует осуществлять протяжку с относительной подачей $\bar{f} = 0,5-1,1$ и величиной обжатия $\varepsilon_h = 0,1-0,15$. При достижении поверхности заготовки температуры 900°C необходимо осуществлять протяжку с относительной подачей от 0,3 до 1,1 с той же величиной обжатия, а при падении температуры поверхности еще на 100°C необходимо уменьшить величину обжатия до $\varepsilon_h = 0,05-0,1$ при тех же подачах.

Рекомендуется при последующем проходе производить протяжку со смещением заготовки на половину ширины бойка, что позволит обеспечить более равномерное распределение интенсивности логарифмических деформаций вдоль оси заготовки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жбанков Я. Г. Дифференцированная ковка протяжкой плоскими бойками / Я. Г. Жбанков, А. А. Швец, М. И. Гунько // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2013. – № 2 (35). – С. 60–65. – ISSN 2076-2151.*
2. Марков О. Е. Эффективная схемаковки крупных слитков с использованием кузнечной протяжки / О. Е. Марков // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – Москва, 2012. – № 8. – С. 33–36.*
3. Марков О. Е. Дослідження процесів кування валів клиновими бойками / О. Е. Марков, О. А. Швець, Р. В. Зінченко // *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2012. – № 2 (27). – С. 151–157.*
4. Каргин С. Б. Теоретический анализ напряженно-деформированного состояния слитка при ковке на трехлепестковую заготовку / С. Б. Каргин, О. Е. Марков, В. В. Кухарь // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 1 (26). – С. 17–21. – ISSN 2076-2151.*
5. Распределение температуры по сечению слитка в процессе охлаждения в изложнице и в вагонетермосе / В. И. Залесский [и др.] // *Кузнечно-штамповочное производство. – 1966. – № 8. – С. 9–11.*
6. Гордеев А. Е. Исследование распределения температурных полей в укороченных бесприбыльных слитках перед ковкой / А. Е. Гордеев, Я. Ю. Ткаченко, А. Н. Чаплынских // *Студенческий вестник ДГМА : темат. зб. науч. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – С. 95–99.*
7. Головина З. Н. Исследование процессов нагрева и охлаждения стальных массивных слитков / З. Н. Головина, О. С. Ересковский, Г. Г. Немзер // *Кузнечно-штамповочное производство. – 1968. – № 1. – С. 35–40.*