

РАЗДЕЛ II ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 621.73.042

Марков О. Е.
Жбанков Я. Г.
Швец А. А.
Таган Л. В.

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА КРУПНЫХ ПОКОВОК СПОСОБОМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ

В современном машиностроении большое внимание уделяется качеству изготавливаемой продукции. Ультразвуковые исследования крупных деталей типа плит обнаруживают наличие внутренних дефектов, которые не соответствуют требованиям Европейского стандарта SEP 1921 по классу D/d . Зона ослабления отраженного сигнала ультразвука имеет форму «мешка», расположенного в центральной части поковки и соответствует потокораспределению металла осевой зоны в процессе осадки [1–4]. Таким образом, можно предположить, что причина снижения качества центральных слоев крупных плит – применение операции осадки, которая назначается при ковке плит для повышения коэффициента укова [5]. Назначение операции осадки вызвано также условием получения плит большой ширины [6]. Более эффективной операцией для повышения качества крупных поковок и снижения затрат на ковку является кузнечная протяжка, которая более интенсивно измельчает дендритное строение литой заготовки и способствует завариванию дефектов осевой зоны [7]. Ограничением применения операции протяжки без осадки является невозможность получения из обычных кузнечных слитков с соотношением $H/D = 1,8 \dots 2,2$ поковок большой ширины.

Исключить осадку для снижения затрат на ковку и повышения качества поковок (за счёт исключения образования внутренних разрывов), при этом обеспечить возможность получения требуемых сечений поковки возможно за счёт применения укороченных слитков специальной конструкции [8, 9] с $H/D = 0,7 \dots 1,2$.

Плиты относятся к простым по геометрической форме поковкам, но для их изготовления часто требуется применение сложных схем ковки и специального инструмента. Это связано в первую очередь с повышенными требованиями, предъявляемыми к ответственным изделиям. Однако из-за неоднородного напряженно-деформированного состояния при ковке толстых плит достаточно сложно обеспечить необходимые свойства таких изделий [6]. Это вызвано образованием значительных зон затрудненной деформации при ковке плоскими бойками.

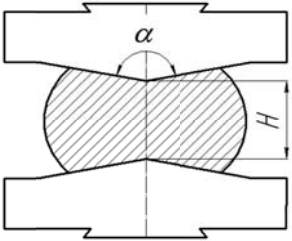
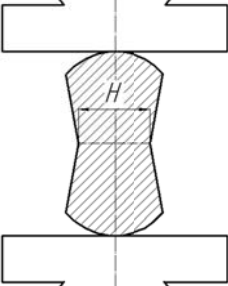
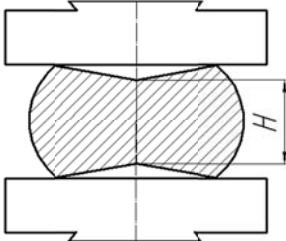
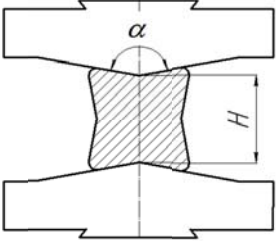
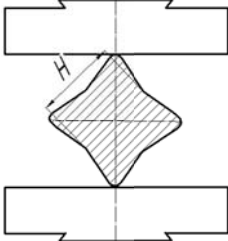
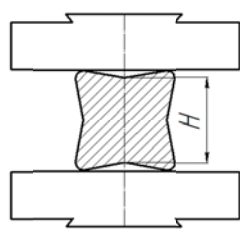
Повысить равномерность распределения деформаций и жесткость схемы напряженно-деформированного состояния в осевой зоне при ковке плоскими бойками возможно за счёт профилирования цилиндрической заготовки – предварительного формирования вогнутых граней на боковой поверхности заготовки (получение дуолучевой и четырехлучевой заготовок), что обеспечит дополнительный подпор при последующей протяжке плоскими бойками [10]. Симметричное профилирование поперечного сечения цилиндрической заготовки с одновременным обеспечением условия универсальности и простоты кузнечного инструмента обеспечивает способ ковки цилиндрической заготовки выпуклыми оппозитными клиновыми бойками с последующей кантовкой на 90° и обжатиями в перпендикулярном направлении для получения четырехлучевой заготовки.

Целью работы является определение напряженно-деформированного состояния и степени закрытия осевых дефектов при профилировании укороченных слитков выпуклыми клиновыми бойками с последующей протяжкой в плоских бойках.

Теоретическое моделирование процессовковки с учетом разупрочнения проводилось с использованием метода конечных элементов [11]. Материал заготовки 34ХНМ, диаметр $D = 2000$ мм, длина 1000 мм. Температура началаковки 1200 °С, осевая пористость слитка моделировалась осевым отверстием, диаметр (d) которого составлял 10 % от диаметра заготовки. Исследуемые углы клиновых бойков 140°, 160° и 180° (плоские). Ковка заготовок производилась по схемам (табл. 1) до квадратного сечения со стороной $a = 1265$ мм, что обеспечивало уков равный 2,0. По результатам моделирования определялись механизм закрытия осевого дефекта, неравномерность распределения деформаций по сечению поковки ($\Delta e = e_{max} - e_{min}$) и показатель жесткости схемы напряженного состояния ($P\sigma$) в осевой зоне.

Таблица 1

Профилирование сечения заготовки

Профилирование на двулучевую заготовку	Правка двулучевой заготовки	
	Укладка «На ребро»	Укладка «Плашмя»
		
Профилирование на четырехлучевую заготовку	Правка четырехлучевой заготовки	
	Укладка «На ребро»	Укладка «Плашмя»
		

Напряженное состояние в осевой зоне при ковке плит по новым схемам. Одно из основных назначений процессаковки – это заковывание осевых дефектов слитков. Оценить степень заваривания осевых дефектов можно на основании данных показателя жесткости схемы напряженного состояния в осевой зоне заготовки в процессе деформирования. Для комплексной оценки напряженного состояния в осевой зоне необходимо рассмотреть все переходыковки плиты (профилирование заготовки и окончательную ковку плоскими бойками).

На первом переходе после внедрения выпуклых клиновых бойков (профилирование заготовки) показатель жесткости схемы напряженного состояния ($P\sigma$) снижается в области отрицательных значений, что свидетельствует об увеличении уровня сжимающих напряжений при увеличении обжатия заготовки (рис. 1, а). Наибольшее неравномерное всестороннее сжатие обеспечивает ковка плоскими бойками. Обжатие бойками с углом 140° на 15 % не обеспечивает высокий уровень сжимающих напряжений в осевой зоне ($P\sigma \approx -0,25$), что объясняет слабое закрытие осевого дефекта (рис. 4, а). При увеличении обжатия от 15 % до 35 % и угла клина бойков показатель $P\sigma$ увеличивается от 2 до 5 раз в зависимости от угла клина бойков (рис. 1, а).

Аналогичные зависимости сохраняются на втором переходе (после кантовки на 90° и продавливания выпуклым бойком до получения симметричной четырёхлучевой заготовки). Можно отметить значительное влияние степени обжатия (глубины формирования вогнутости граней) и увеличения угла клина бойков ($160^\circ \dots 180^\circ$) на повышение показателя жёсткости схемы напряжённого состояния (рис. 1). Высокий уровень сжимающих напряжений ($P\sigma \approx -1,5 \dots -2,0$) для этих условий обеспечивает полное закрытие осевого дефекта (рис. 4, б).

Из проведенного анализа следует, что для интенсивного закрытия осевых дефектов необходимо формировать двулучевую и четырёхлучевую заготовку со степенью обжатия 25...30 % бойками с углом в диапазоне $160 \dots 180^\circ$.

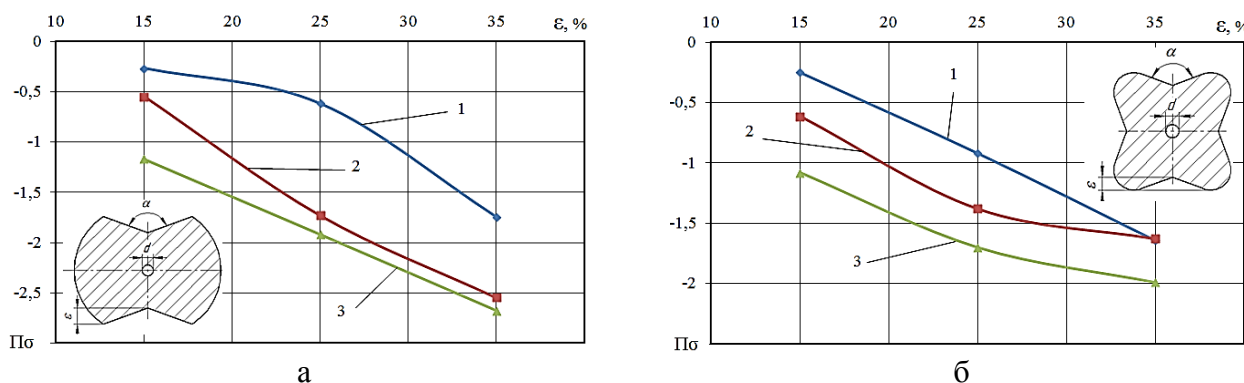


Рис. 1. Изменение показателя жёсткости схемы напряженного состояния в зависимости от обжатия для различных углов клина бойков для двулучевых (а) и четырехлучевых (б) заготовок: 1 – угол клина бойков 140° ; 2 – угол клина бойков 160° ; 3 – плоские бойки (180°)

Последующая протяжка двулучевой заготовки с углом вогнутости граней 160° , глубиной вогнутости граней 15 % и 25 % с расположением заготовки «на ребро» и «плашмя» плоскими бойками (рис. 5, а) обеспечивает высокий уровень сжимающих напряжений в осевой зоне ($P\sigma = -2,2 \dots -2,4$) на втором переходе ковки (обжатие на 15...25 % двулучевой заготовки, установленной в пространство плоских бойков «на ребро» и «плашмя»). На третьем переходе (после кантовки на 90°) (показатель $P\sigma$ составляет $-1,9 \dots -2,1$) уровень сжимающих напряжений становится меньше. Обжатие двулучевой заготовки с глубиной вогнутости граней 15 % и 25 % при укладке «на ребро» обеспечивает схожие зависимости с отклонением 4...6 % изменения показателя жесткости схемы напряженного состояния $P\sigma$ (рис. 2, а, кривая 1 и 2). Это объясняется различным сечением в центральной зоне – для большей толщины плиты ($\varepsilon = 15\%$) подпор со стороны вогнутых граней больше.

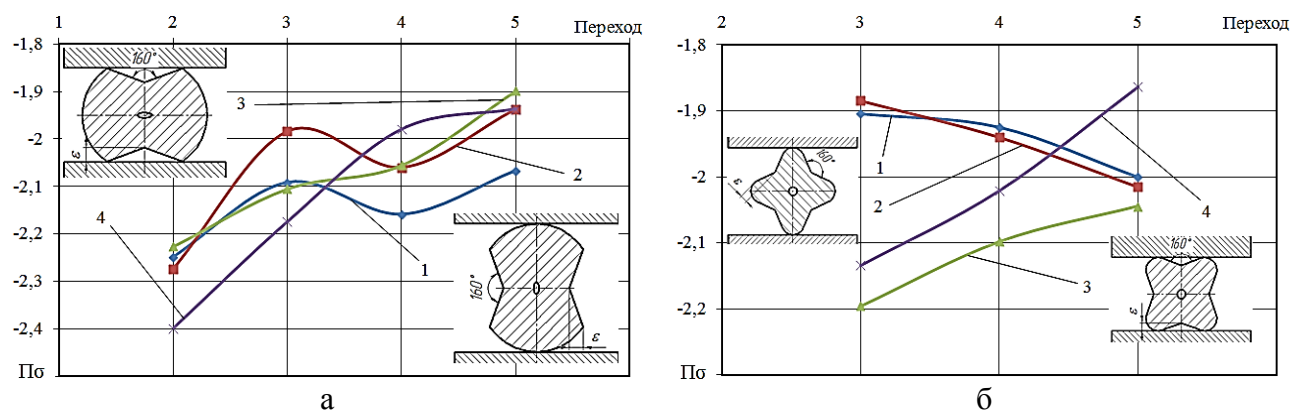


Рис. 2. Изменение показателя жёсткости схемы напряженного состояния при протяжке двулучевой (а) и четырехлучевой (б) заготовки с углом 160° и глубиной вогнутости граней 15 % и 25 % с различным способом укладки профилированной заготовки:

1 – укладка «на ребро» $\varepsilon = 15\%$; 2 – укладка «на ребро» $\varepsilon = 25\%$; 3 – укладка «плашмя» $\varepsilon = 15\%$; 4 – укладка «плашмя» $\varepsilon = 25\%$

При обжатии двулучевой заготовки плоскими бойками с расположением «плашмя» $P\sigma$ характеризуется снижением уровня сжимающих напряжений при последующих переходахковки для различных глубин вогнутости (15 % и 25 %) (рис. 2, а, линии 3 и 4). Это объясняется отсутствием вогнутых граней заготовки при таком способе укладки. При этом уровень $P\sigma$ не выходит за пределы $-2,2 \dots -1,9$, что свидетельствует о состоянии в осевой зоне неравномерного сжатия.

Протяжка четырехлучевой заготовки с углом вогнутости граней 160° и глубиной 15 % и 25 % с расположением заготовки «плашмя» (рис. 5, б) обеспечивает высокие сжимающие напряжения в осевой зоне ($P\sigma = -2,1 \dots -2,2$) на третьем переходековки (ковка профилированной четырехлучевой заготовки плоскими бойками). При протяжке четырехлучевой заготовки по схеме «на ребро» с глубиной вогнутости граней $\varepsilon = 15\%$ (рис. 2, б, кривая 1) и с $\varepsilon = 25\%$ (рис. 2, б, кривая 2) $P\sigma$ снижается примерно на 5 %. Что объясняется незначительным влиянием подпора вогнутых граней при укладке четырехлучевой заготовки «на ребро». При протяжке с укладкой «плашмя» и с обжатием $\varepsilon = 15\%$ (рис. 2, б, кривая 3) и $\varepsilon = 25\%$ (рис. 2, б, кривая 4) уровень сжимающих напряжений уменьшается с увеличением числа переходов практически линейно. Для схемы укладки заготовки «плашмя» с $\varepsilon = 15\%$ уровень сжимающих напряжений выше, за счет большей толщины заготовки при меньших обжатиях, что приводит к локализации максимальных деформаций в осевой зоне и обеспечивает закрытие дефектов при ковке четырехлучевых заготовок с расположением «плашмя» на 3 и 4 переходах и объясняется подпором вогнутых граней заготовки. По мере выравнивания вогнутых граней заготовки подпор снижается и схема деформирования приближается к способу укладки «на ребро».

Протяжка двулучевой заготовки с углом 180° (плоскими бойками) с обжатиями 15 %, 25 % и 35 % с расположением заготовки «на ребро» и «плашмя» (рис. 3, а) обеспечивают высокий уровень сжимающих напряжений в осевой зоне ($P\sigma = -2,0 \dots -2,3$) на втором переходековки (ковка заготовки прямоугольного сечения), но при последующей протяжке сжимающие напряжения уменьшаются ($P\sigma = -1,7 \dots -1,9$).

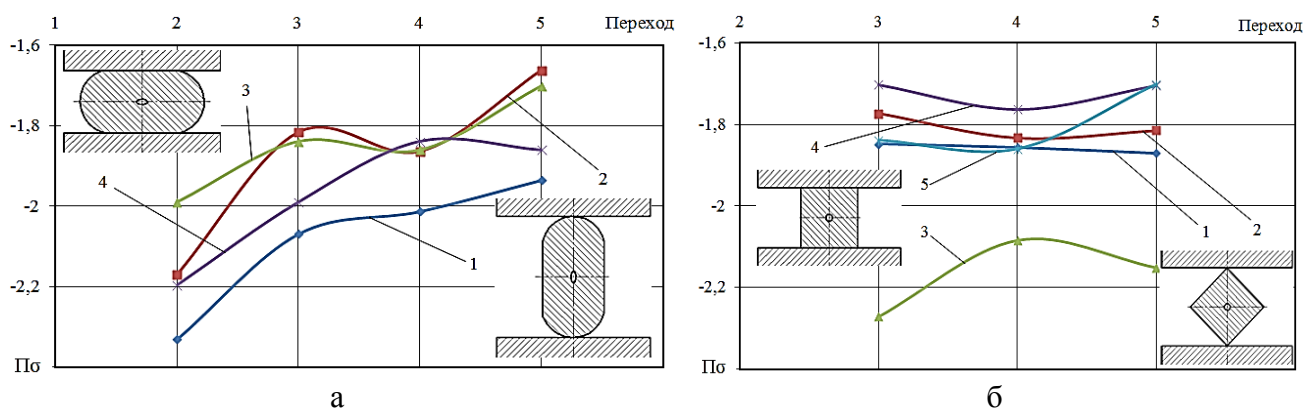


Рис. 3. Изменение показателя жёсткости схемы напряженного состояния при протяжке двулучевой (а) и четырехлучевой (б) заготовки после первого перехода с углом 180° и обжатием 15 %, 25 % и 35 %:

1 – укладка «на ребро» $\varepsilon = 15\%$; 2 – укладка «на ребро» $\varepsilon = 25\%$; 3 – укладка «на ребро, плашмя» $\varepsilon = 35\%$ (а), «плашмя» $\varepsilon = 15\%$ (б); 4 – укладка «плашмя» $\varepsilon = 15\%$ и 25 %

Протяжка заготовки с квадратным поперечным сечением со степенями обжатия 15 %, 25 % и 35 % с расположением «на ребро» и «плашмя» (рис. 3, б) обеспечивает меньший уровень сжимающих напряжений, чем протяжка четырехлучевых заготовок с углом 160° (рис. 2, б). Схемы укладки «на ребро» и «плашмя» для различных степеней обжатия обеспечивают одинаковые значения $P\sigma$ в диапазоне $-1,7 \dots -1,9$ (рис. 3, б, линии 1, 2, 4, 5). Высокий уровень показателя $P\sigma \approx -2,1 \dots -2,3$ обеспечивает протяжка заготовки «плашмя» с предварительной степенью обжатия 15 % (рис. 3, б, кривая 3), что объясняется большими величинами обжатия при последующих переходах до получения заданного размера ($a = 1265$ мм).

Отсутствие вогнутых граней на заготовке (в случае профилирования плоскими бойками) приводит к снижению уровня сжимающих напряжений в осевой зоне заготовки (рис. 3, а и б), в сравнении с протяжкой профилированной четырехлучевой заготовки с углом вогнутости граней 160° (рис. 3, а и б). Это объясняется отсутствием влияния подпора вогнутых граней заготовки при последующих переходах на уровень сжимающих напряжений.

Закрытие осевых дефектов при профилировании заготовки на двулучевое и четырехлучевое сечение. При обжатии цилиндрической заготовки выпуклыми оппозитными бойками (угол 140° , 160° , 180°) было установлено, что дефект интенсивнее закрывается при ковке бойками с углом 180° – плоские бойки. После обжатия заготовки плоскими бойками ($\alpha = 180^\circ$) на 35 % дефект закрывается полностью. Для угла бойка равного 140° дефект после обжатия на 35 % закрывается на 52 %, а для угла 160° на 72 % (рис. 4, а).

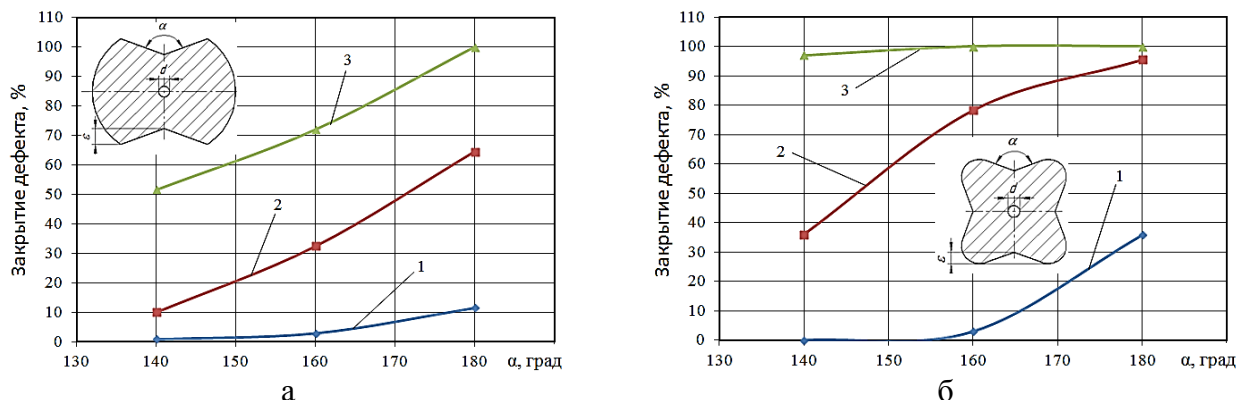


Рис. 4. Закрытие осевого дефекта после получения двулучевой заготовки (а) и четырехлучевой заготовки (б) с различными углами и глубиной вогнутостей:

1 – обжатие 15 %; 2 – обжатие 25 %; 3 – обжатие 35 %

Анализ результатов исследования механизма закрытия осевого дефекта позволил установить, что получение четырехлучевой заготовки с глубиной вогнутостей граней 15 % не обеспечивает полного закрытия дефекта (рис. 4, б, кривая 1) – диаметр дефекта становится меньше исходного на 10...35 % в зависимости от угла клина бойка (чем больше угол бойка, тем интенсивнее закрывается дефект). Увеличение обжатия до 25 % способствует более интенсивному закрытию осевого дефекта, особенно дляковки плоскими бойками (угол 180°) в этом случае дефект закрывается полностью (рис. 4, б, кривая 2). Для угла равного 140° – на 40 %, а 160° – на 80 %. Для четырехлучевых заготовок с глубиной вогнутости 35 % осевой дефект закрывается полностью для углов 160° и 180° и на 95 % для угла 140° (рис. 4, б, кривая 3). Таким образом, угол равный 140° не эффективен с точки зрения закрытия осевых дефектов, поэтому дальнейшее исследование процессовковки профилированных заготовок проводилось для углов 160° и 180° .

Распределение деформаций при профилировании клиновыми и правке плоскими бойками. Применение выпуклых клиновых бойков с углом равным 160° способствует проработке поверхностных слоёв заготовки с уменьшением площади зон затрудненной деформации. Минимальную неравномерность распределения деформаций $\Delta\epsilon = 2,48$ обеспечивает правка плоскими бойками двулучевой заготовки с глубиной вогнутости граней $\epsilon = 25\%$ и укладкой «на ребро» (рис. 5 а, кривая 2). Однако, получение двулучевой заготовки не обеспечивает проработку боковых частей сечения поковки.

Анализ результатов неравномерности распределения деформаций по сечению плиты для схемы правки плоскими бойками четырехлучевой заготовки с углом вогнутости равным 160° позволил установить, что максимальную неравномерность распределения деформаций ($\Delta\epsilon \approx 3,5$) обеспечивает схема правки с расположением четырехлучевой заготовки «на ребро» (рис. 5, б, кривые 1 и 2). Минимальную неравномерность распределения деформаций ($\Delta\epsilon \approx 2,0$) обеспечивает схема правки с укладкой заготовки «плашмя» (рис. 5, б, кривые 3 и 4).

Поэтому получение равномерно проработанной литой структуры слитка обеспечивает схемаковки плоскими бойками с укладкой «плашмя», что будет гарантировать получение равномерности механических свойств поковки.

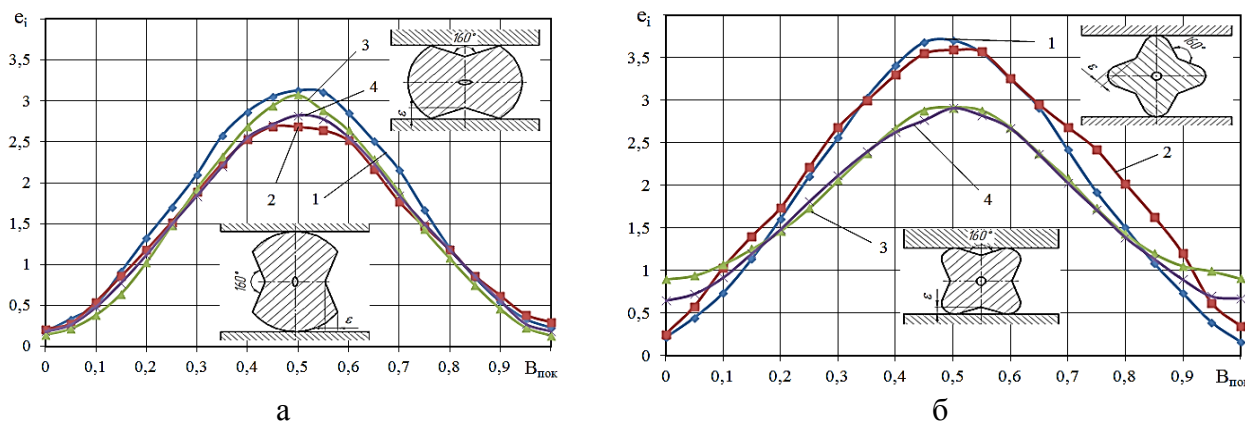


Рис. 5. Неравномерность распределения деформаций послековки на квадратное сечение плоскими бойками двулучевых (а) и четырехлучевых (б) заготовок с углом 160° и глубиной вогнутости граней $\varepsilon = 15\%$ и 25% с различным способом укладки профилированной заготовки:

1 – укладка «на ребро» $\varepsilon = 15\%$; 2 – укладка «на ребро» $\varepsilon = 25\%$; 3 – укладка «плашмя» $\varepsilon = 15\%$; 4 – укладка «плашмя» $\varepsilon = 25\%$

Для схемыковки плоскими бойками (180°) максимальные деформации в центральной зоне с уровнем в $3,1 \dots 3,3$ единицы обеспечивают схемы с обжатием $\varepsilon = 15\%$, 25% , 35% , укладкой «на ребро» и «плашмя» (рис. 6, а). Для этих схем характерна высокая неравномерность распределения деформаций по ширине поковки $\Delta\varepsilon = 2,9 \dots 3,1$ за счёт наличия значительной зоны затруднённой деформации в периферийной части. Поэтому для данного угла не имеет значения, по какой схеме осуществлять протяжку с укладкой «на ребро» или «плашмя».

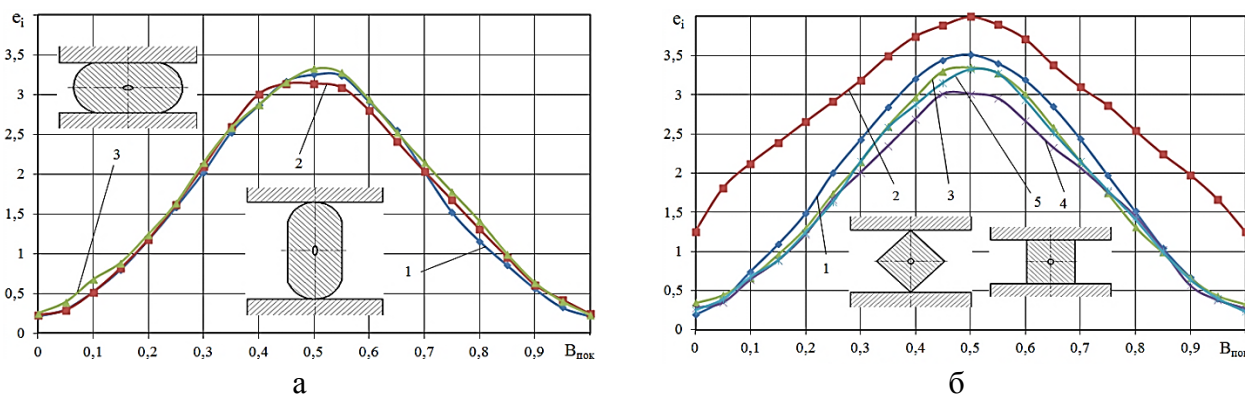


Рис. 6. Неравномерность распределения деформаций после протяжки плоскими бойками (угол 180°) двулучевых заготовок с обжатием 15% , 25% и 35% :

1 – укладка «на ребро» $\varepsilon = 15\%$; 2 – укладка «на ребро» $\varepsilon = 25\%$; 3 – укладка «на ребро» $\varepsilon = 35\%$ (а) и «плашмя» $\varepsilon = 15\%$ (а и б), 25% , 35% ; 4 – укладка «плашмя» $\varepsilon = 25\%$; 5 – укладка «плашмя» $\varepsilon = 25\%$

Для схемковки плоскими бойками (угол 180°) максимальные деформации в центральной зоне с уровнем в $\approx 4,0$ единицы обеспечивает схема с обжатием $\varepsilon = 25\%$ с укладкой «на ребро» (рис. 6, б, кривая 2). Минимальную неравномерность распределения деформаций ($\Delta\varepsilon = 2,74$) обеспечивает схема укладки заготовки «плашмя» после обжатия на $\varepsilon = 25\%$ (рис. 6, б, кривая 4). Поэтому более благоприятной схемой будет способ укладки «на ребро» с предварительным обжатием $\varepsilon = 25\%$, который обеспечивает высокий уровень деформаций в осевой зоне с минимальной неравномерностью их распределения ($\Delta\varepsilon = 2,75$) (рис. 6, б, кривая 2).

ВЫВОДЫ

Максимальные сжимающие напряжения (наименьшие значения показателя жесткости схемы напряженного состояния) в осевой зоне предварительно профилированной на четырехлучевую заготовки при окончательной ковке плоскими бойками обеспечивает угол вогнутости 160° , глубина вогнутости граней 15 % с укладкой «плашмя».

Результаты исследования закрытия осевого дефекта при профилировании выпуклыми клиновыми бойками показали, что чем больше угол бойка и величина обжатия, тем интенсивнее закрывается осевой дефект. Для плоских бойков обжатия по диаметру заготовки достаточно 25 %, для угла 160° – 35 %, а для угла 140° – больше 35 %. Таким образом, угол в 140° не рационален для получения четырехлучевых профилированных заготовок с точки зрения закрытия осевого дефекта слитка.

Были выделены схемы, которые обеспечивают равномерное распределение деформаций по сечению, в отличие от классических схем получения плит. Ковка плоскими бойками профилированных четырехлучевых заготовок с углом вогнутости граней 160° и глубиной 15...25 %, которые укладываются в бойках «плашмя» и заготовка квадратного поперечного сечения с обжатием 25 %, которая протягивается способом укладки «на ребро».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование протяжки вырезными бойками / С. Б. Каргин, Б. С. Каргин, В. В. Кухарь, О. Е. Марков // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 1 (22). – С. 111–113.*
2. Ковка крупных плит без осадки слитков / И. С. Алиев, О. Е. Марков, В. М. Олешко, И. Г. Савчинский // *Металлург. – Москва, 2004. – Спецвыпуск. – С. 35–37.*
3. Соколов Л. Н. Ковка крупных поковок без осадки слитков / Л. Н. Соколов, О. Е. Марков, В. М. Олешко // *Тяжелое машиностроение. – Москва, 2006. – № 3. – С. 19–21.*
4. Марков О. Е. Изменение размеров осевых дефектов при осадке заготовок / О. Е. Марков // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 4 (29). – С. 103–110.*
5. Markov O. Investigation of the New Technological Process of Forging Large Shafts without Upsetting / O. Markov, V. Oleshko, V. Zligorev // *METAL 2012 : Proceedings on CD-ROM. – Brno, Czech Republic, 2012. – ISBN 978-80-87294-29-1. Available on Web site : <http://www.metal2012.com>.*
6. Опытковки крупногабаритных плит большой толщины / Л. П. Белова, Б. М. Шлякман, Ю. И. Рыбин, Л. О. Комова // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – Москва, 2001. – № 10. – С. 7–10.*
7. Марков О. Е. Эффективная схемаковки крупных слитков с использованием кузнечной протяжки / О. Е. Марков // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – Москва, 2011. – № 8. – С. 44–48.*
8. Марков О. Е. Исследование укороченных кузнечных слитков с направленной кристаллизацией / О. Е. Марков // *Металл и литье Украины. – Киев, 2012. – № 7. – С. 12–16.*
9. Пат. 21205 Україна, МПК В 22 D 7/06. Виливниця для відливання зливків / Марков О. Є. ; заявник і патентовласник Донбаська державна машинобудівна академія. – № u200605198 ; заявл. 12.05.06 ; опубл. 15.03.07, Бюл. № 3.
10. Внедрение энергосберегающего технологического процессаковки крупных слитков без осадки / О. Е. Марков, В. М. Олешко, В. Н. Злыгорев, И. А. Грачев // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – Москва, 2011. – № 10. – С. 33–36.*
11. Марков О. Е. Установление аналитической связи между напряжениями и скоростями деформаций для моделирования процессов горячего деформирования / О. Е. Марков // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – Москва, 2012. – № 7. – С. 32–37.*

Марков О. Е. – д-р техн. наук, проф. каф. ОМД ДГМА;

Жбанков Я. Г. – канд. техн. наук, ст. преп. каф. ОМД ДГМА;

Швец А. А. – аспирант ДГМА;

Таган Л. В. – аспирант ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: oleg.markov.omb@mail.ru

Статья поступила в редакцию 22.03.2013 г.