

УДК 621.735.36

Марков О. Е., Швець А. А., Зинченко Р. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОВКИ ВАЛОВ КЛИНОВЫМИ БОЙКАМИ

Кузнечный слиток имеет неоднородное макростроение, которое определяет разброс механических и физико-химических свойств по его объему и их анизотропию по различным направлениям [1, 2]. Основным дефект кузнечного слитка, который должен быть устранен операциями ковки – осевая рыхлость и пористость, образование которой в кузнечном слитке вызвано условиями кристаллизации металла. Эффективным способом заковывания осевых дефектов слитков является применение кузнечной операции протяжки, которая способствует интенсивному закрытию осевых дефектов, что не характерно для операции осадки [3, 4].

Исключение операции осадки без увеличения сечения слитка невозможно. Решить эту задачу можно за счет применения укороченных слитков, у которых высота меньше диаметра. Соотношение высоты слитка к его диаметру $H/D < 1,2$ характеризуется меньшей ликвацией, протяженностью осевой рыхлости и более плотным строением [5]. Применение для ковки крупных поковок укороченных слитков позволит повысить качество поковок и снизить затраты на их производство. Ковка без вспомогательной энергоёмкой операции осадки позволит повысить производительность процесса, снизить затраты энергии на деформирование и исключить один подогрев заготовки, что позволит снизить расход природного газа.

Ковка укороченных слитков может производиться за счёт применения операции протяжки, которая обеспечивает более высокую проковку литого металла. Процесс ковки-протяжки занимает довольно значительное место как в технологических процессах на производстве, так и в исследовательских работах, посвященных пластическому течению металла. Большинство задач и полученных решений относится к формоизменению заготовки при протяжке различными бойками – плоскими, вырезными или комбинированными [6].

Протяжка является простейшей и довольно распространенной кузнечной операцией. Протяжке подвергаются почти все кузнечные слитки, а также подавляющее большинство поковок удлиненной формы, изготавливаемых из проката свободной ковкой. Трудоемкость протяжки составляет около 60 % общей трудоемкости кузнечных цехов.

Особенно велико значение протяжки при ковке крупных слитков из легированных сталей, предназначенных для изготовления таких ответственных деталей энергетического и судового машиностроения, как валы гидротурбин, роторы электрогенераторов, роторы паровых турбин, гребные валы судов, крупные коленчатые валы и т. д. Здесь протяжка является основной операцией, поковке придается необходимая форма и обеспечиваются при надлежащей степени укова качество и надежность [7].

Цель работы – повышение технико-экономических показателей процесса ковки валов на основе разработки технологических способов деформирования профилированным инструментом.

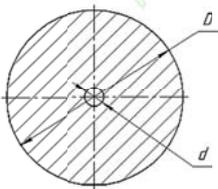
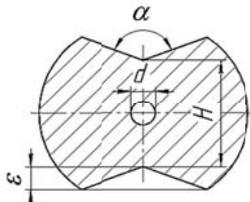
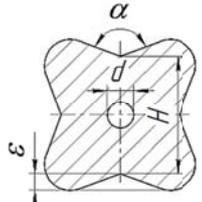
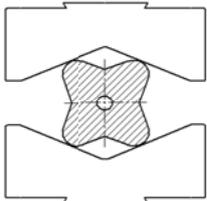
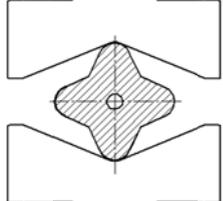
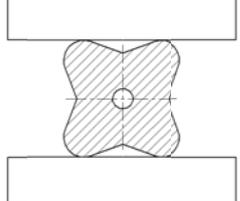
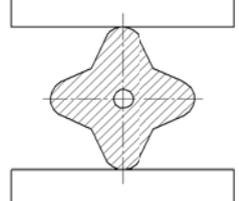
Для исследования выбран метод конечных элементов. Моделирование производилось программой Deform 3D (временная лицензия каф. ОМД ДГМА). Материал заготовки 34ХНМ, диаметр 2000 мм, длина 1000 мм. Температура начала ковки 1200 °С. Осевая пористость слитка моделировалась осевым отверстием, которое составляло 10 % от диаметра заготовки. Угол вырезных бойков 135 °, клиновых 140 °, 160 °. Данные углы бойков были приняты с целью изучения их влияния на проработку осевой зоны поковки, а также для установление их влияния на характерные для этого процесса застойные зоны поковки.

Ковка заготовок для всех схем деформирования производилась до диаметра 1265 мм, что обеспечивало уков 2,5 для возможности оценки влияния формы бойков на напряженно-деформированное состояние и заковывание осевого дефекта. По результатам моделирования

определялся показатель жесткости схемы напряженного состояния ($P\sigma$) в осевой зоне, неравномерность распределения деформаций по диаметру поковки ($\Delta e = e_{max} - e_{min}$).

Степень деформации по высоте во время получения (протяжки) четырехлучевой заготовки в клиновых и плоских бойках составляла $2\varepsilon = 15\%$, 25% и 35% перед обкаткой на вал в вырезных и плоских бойках со схемой укладки «плашмя» и «на ребро» до диаметра 1265 мм (табл. 1). Таким образом, было получено 36 возможных вариантов исследуемого процесса.

Таблица 1

Схемы ковки			
Заготовка	Первый нажим	Четырехлучевая	
			
Варианты обкатки поковки			
В вырезных бойках		В плоских бойках	
«Плашмя»	«На ребро»	«Плашмя»	«На ребро»
			

При обжатии цилиндрической заготовки выпуклыми оппозитными бойками (угол 140° , 160° , 180°) можно отметить, что дефект интенсивнее закрывается при ковке бойками с углом 180° – плоские бойки. После обжатия заготовки плоскими бойками более 25% дефект закрывается полностью. Для угла в 140° дефект после обжатия на 35% закрывается на 80% (рис. 1).

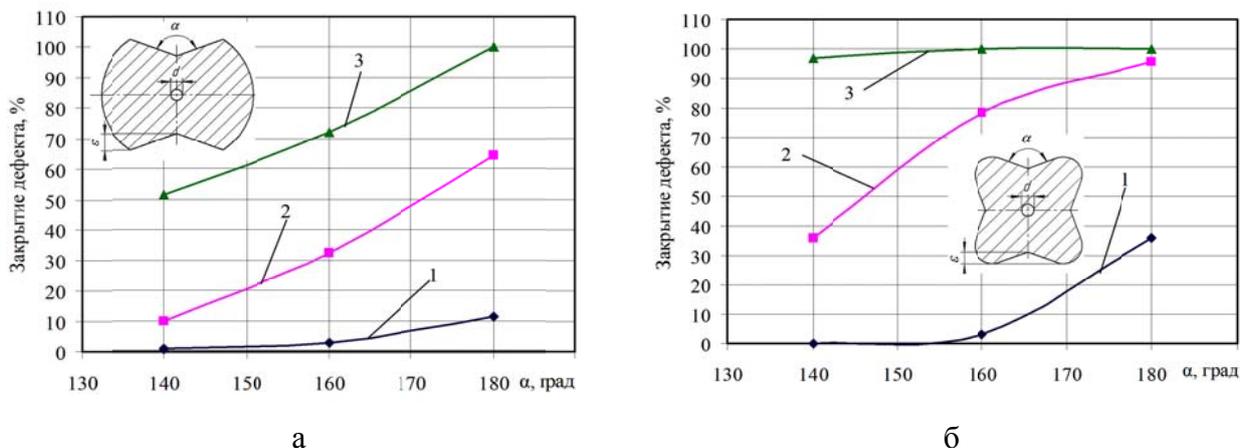


Рис. 1. Закрытие осевого дефекта при получении двухлучевой (а) и четырехлучевой (б) заготовки с различными углами и глубиной вогнутостей:
1 – обжатие 15% ; 2 – обжатие 25% ; 3 – обжатие 35%

Получение четырёхлучевой заготовки с глубиной вогнутостей граней 15 % не обеспечивает полного закрытия дефекта – диаметр дефекта меньше исходного на 10...35 % в зависимости от угла бойка (чем больше угол бойка, тем сильнее закрывается дефект). Это объясняется недостаточной величиной обжатия заготовки. Увеличение обжатия до 25 % способствует более интенсивному закрытию осевого дефекта, особенно дляковки плоскими бойками (угол 180°) в этом случае дефект закрывается полностью. Для угла в 140° на 40 %, а в 160° – на 80 %. Для четырёхлучевых заготовок с глубиной вогнутости 35 % осевой дефект закрывается полностью для углов 160° и 180° и на 95 % для угла 140°.

Можно сделать вывод, что чем больше угол бойка и глубина вогнутостей граней (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 четырёхлучевых заготовок с точки зрения закрытия осевого дефекта слитка.

Для выбора эффективной схемыковки необходимо провести количественное сравнение распределения деформаций по сечению поковки для схемковки, которые не приводят к образованию поверхностных зажимов. Распределение деформаций определялось по диаметру поковки в зоне максимальной её неравномерности – на середине ширины бойка, где присутствуют застойные зоны, контактирующие с инструментом и максимальные в осевой зоне.

Для угла в 160° максимальные деформации в центральной зоне с уровнем в 6,0 единиц обеспечивает схема обкатки плоскими бойками четырёхлучевой заготовки с глубиной вогнутости граней (обжатием) $2\varepsilon = 25\%$ (рис. 2, линия 2). Минимальные деформации для этой схемы $\approx 2,0$ единиц (неравномерность деформаций $\Delta e = 4,0$). Наименьший уровень накопленных деформаций для угла 160° обеспечивают схемы обкатки вырезными бойками с укладкой заготовки «на ребро» (рис. 2, линия 5 и 6). Минимальную неравномерность распределения деформаций для этого угла вогнутости $\Delta e = 2,73$ обеспечивает обкатка в вырезных бойках заготовок с вогнутостью $2\varepsilon = 25\%$ с укладкой плашмя (рис. 2, линия 7).

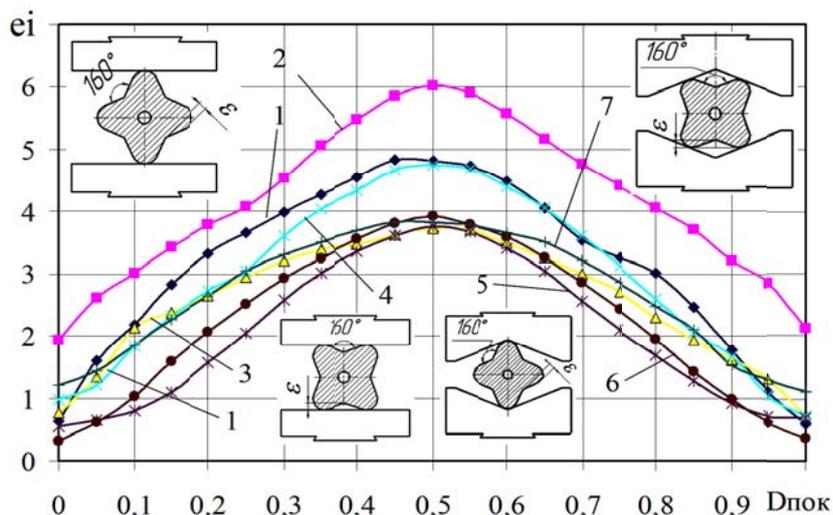


Рис. 2. Неравномерность распределения деформаций после обкатки вырезными и плоскими бойками четырёхлучевых заготовок с углом 160° и глубиной вогнутости граней 15 % и 25 %:

1 – плоские бойки «на ребро» $2\varepsilon = 15\%$; 2 – плоские бойки «на ребро» $2\varepsilon = 25\%$; 3 – плоские бойки «плашмя» $2\varepsilon = 15\%$; 4 – плоские бойки «плашмя» $2\varepsilon = 25\%$; 5 – вырезные бойки «на ребро» $2\varepsilon = 15\%$; 6 – вырезные бойки «на ребро» $2\varepsilon = 25\%$; 7 – вырезные бойки «плашмя» $2\varepsilon = 25\%$

Для угла в 180° и последующей обкатке вырезными бойками максимальные деформации в центральной зоне с уровнем в 5,0 единиц обеспечивает схема с глубиной вогнутости граней (обжатию) $2\varepsilon = 35\%$ с укладкой «на ребро» (рис. 3, а, линия 3). Но для этой схемы характерна высокая неравномерность распределения деформаций по диаметру поковки ($\Delta\varepsilon = 4,49$) за счёт наличия значительной зоны затруднённой деформации в периферийной части.

Минимальную неравномерность распределения деформаций для этого угла вогнутости $\Delta\varepsilon = 2,61$ при максимальном значении деформации в осевой зоне $\approx 3,0$ единиц, обеспечивает укладка заготовки «плашмя» с вогнутостью $2\varepsilon = 15\%$ с укладкой плашмя (рис. 3, а, линия 4).

Для угла в 180° с последующей обкаткой плоскими бойками через квадратное и восьмигранное сечение максимальные деформации в центральной зоне с уровнем в 5,5 единиц обеспечивают две схемы с глубиной вогнутостей граней 15% и 35% с укладкой «плашмя» (рис. 3, б, линия 4 и 6). Минимальную неравномерность распределения деформаций ($\Delta\varepsilon = 3,5$) с относительно высокой деформацией в осевой зоне обеспечивает схема обкатки с укладкой «на ребро» четырёхлучевой заготовки с глубиной вогнутости граней $2\varepsilon = 25\%$ (рис. 3, б, линия 2).

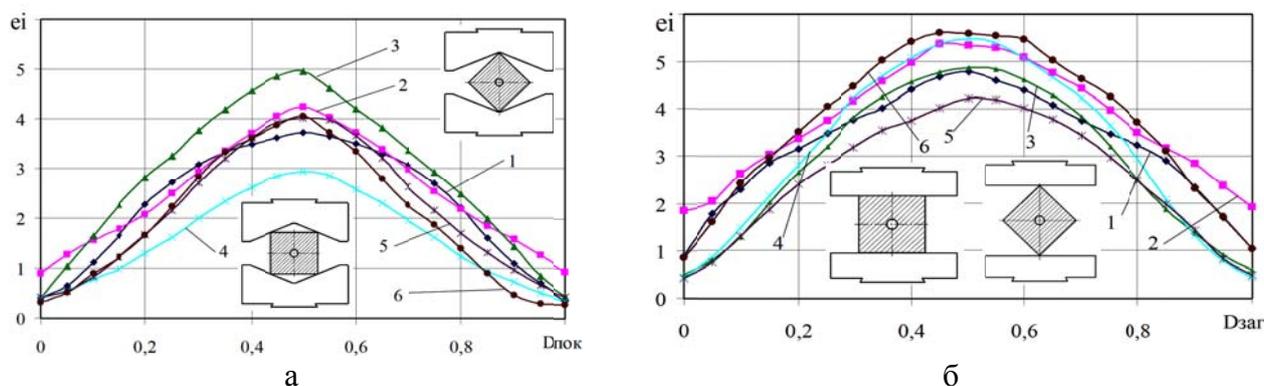


Рис. 3. Неравномерность распределения деформаций после обкатки вырезными (а) и плоскими (б) бойками четырёхлучевых заготовок с углом 180° и глубиной вогнутости граней 15%, 25% и 35%:

1 – укладка «на ребро» $2\varepsilon = 15\%$; 2 – укладка «на ребро» $2\varepsilon = 25\%$; 3 – укладка «на ребро» $2\varepsilon = 35\%$; 4 – укладка «плашмя» $2\varepsilon = 15\%$; 5 – укладка «плашмя» $2\varepsilon = 25\%$; 6 – укладка «плашмя» $2\varepsilon = 35\%$

На первом переходе после внедрения выпуклых клиновых бойков показатель жёсткости схемы напряжённого состояния характеризует увеличение состояния всестороннего неравномерного сжатия при увеличении величины обжатия заготовки (рис. 4 а). Наибольшее сжатие обеспечивает ковка плоскими бойками (угол 180° , линия 3). Обжатие бойком в 140° при обжатии на 15% не обеспечивает сжимающих напряжений в осевой зоне ($P\sigma \approx -0,25$), что объясняет отсутствие закрытия осевого дефекта (рис. 1). При увеличении обжатия от 15% до 35% показатель $P\sigma$ увеличивается от 2 до 5 раз в зависимости от угла клина бойков и для углов 160° и 180° составляет $P\sigma \approx -2,5$.

Аналогичные зависимости сохраняются при втором переходе (кантовка на 90° и продавливание выпуклым бойком до получения четырёхлучевой заготовки). Можно отметить значительное влияние степени обжатия (глубины вогнутости граней) и увеличения угла клина бойков (от 16° до 180°) на обеспечение более жёсткой схемы напряжённого состояния (рис. 4, б). Высокий уровень сжимающих напряжений ($P\sigma \approx -1,5 \dots -2,0$) для этих условий обеспечивает полное закрытие осевого дефекта (рис. 1). Из проведенного анализа следует, что для интенсивного закрытия осевых дефектов необходимо формировать четырёх лучевую заготовку со степенью обжатия 25...30% бойками с углом в диапазоне $160 \dots 180^\circ$.

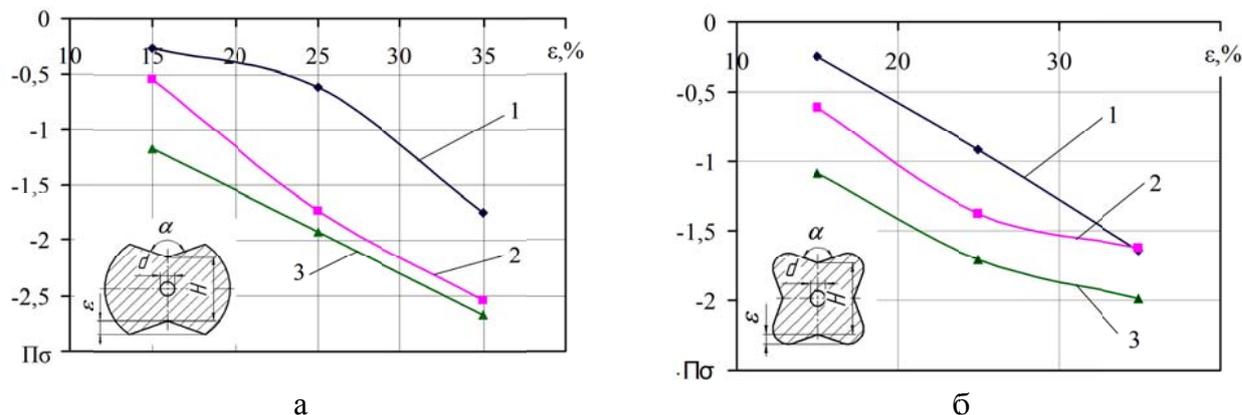


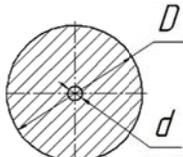
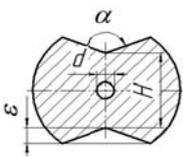
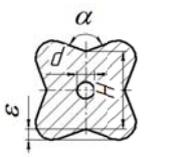
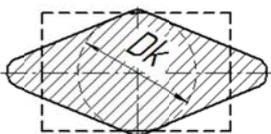
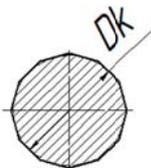
Рис. 4. Изменение показателя жёсткости схемы напряженного состояния в зависимости от глубины вогнутостей граней для различных углов клина бойков для первого (а) и второго (б) обжатия:

1 – угол клина бойков 140 °; 2 – угол клина бойков 160 °; 3 – угол клина бойков 180 °

Схемы основных переходов ковки вала представлены в табл. 2.

Таблица 2

Основные переходы ковки вала

Заготовка	1-й переход	2-й переход
		
3-й переход	4-й переход	5-й переход
		

Обкатка четырёхлучевой заготовки с углом вогнутости граней 160 ° плоскими бойками с глубиной вогнутости граней 15 % и 25 % с расположением заготовки «на ребро» и «плашмя» (рис. 5, линии 1, 2, 3, 4) обеспечивают не высокие сжимающие напряжения в осевой зоне (показатель $P\sigma$ составляет 1,5...2,0). В отличие от обкатки плоскими бойками вырезные обеспечивают в 2...2,5 раза выше уровень сжимающих напряжений в осевой зоне (рис. 5, линии 5, 6, 7) особенно при укладке «на ребро» четырёхлучевой заготовки с глубиной вогнутости граней 15 % (линия 5). Это приводит к локализации максимальных деформаций в осевой зоне.

Отсутствие вогнутых граней на заготовке (в случае профилирования плоскими бойками с углом 180 °) приводит к возникновению сжимающих напряжений в осевой зоне заготовки в 1,5 раз ниже (рис. 6). Это подтверждает сильное влияние вогнутых граней заготовки перед последующей обкаткой в вырезных бойках на уровень сжимающих напряжений. Все рассматриваемые способы обкатки заготовок с квадратным поперечным сечением (угол 180 °) с различной глубиной обжатия и способом укладки в вырезных бойках обеспечивают одинаковые значения $P\sigma$ в диапазоне -3,0...-3,5.

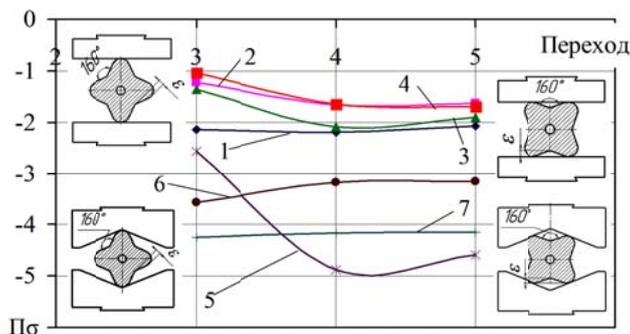
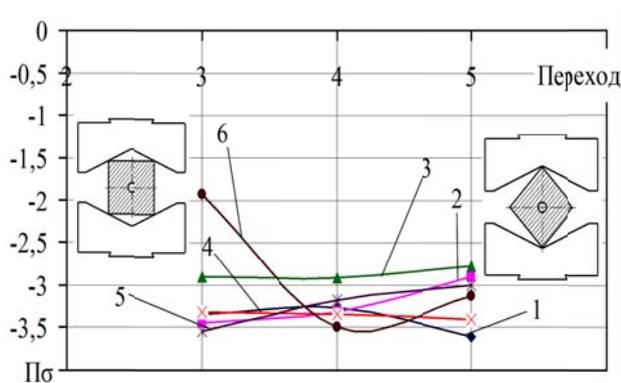
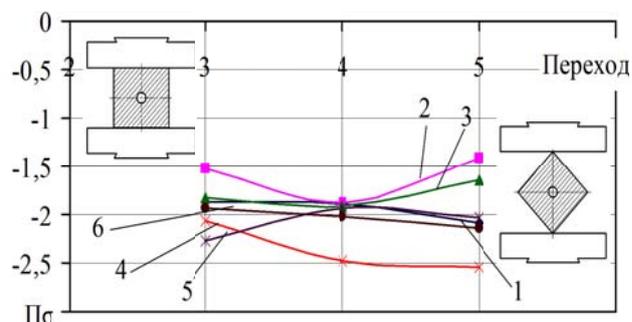


Рис. 5. Изменение показателя жёсткости схемы напряженного состояния при обкатке четырёхлучевой заготовки с углом 160° и глубиной вогнутости граней 15 % и 25 %:

1 – плоские бойки «на ребро» $2\varepsilon = 15\%$; 2 – плоские бойки «на ребро» $2\varepsilon = 25\%$; 3 – плоские бойки «плашмя» $2\varepsilon = 15\%$; 4 – плоские бойки «плашмя» $2\varepsilon = 25\%$; 5 – вырезные бойки «на ребро» $2\varepsilon = 15\%$; 6 – вырезные бойки «на ребро» $2\varepsilon = 25\%$; 7 – вырезные бойки «плашмя» $2\varepsilon = 25\%$



а



б

Рис. 6. Изменение показателя жёсткости схемы напряженного состояния при обкатке четырёхлучевой заготовки с углом 180° вырезными (а) и плоскими (б) бойками и глубиной вогнутости граней 15 %, 25 % и 35 %

1 – укладка «на ребро» $2\varepsilon = 15\%$; 2 – укладка «на ребро» $2\varepsilon = 25\%$; 3 – укладка «на ребро» $2\varepsilon = 35\%$; 4 – укладка «плашмя» $2\varepsilon = 15\%$; 5 – укладка «плашмя» $2\varepsilon = 25\%$; 6 – укладка «плашмя» $2\varepsilon = 35\%$

Обкатка таких же заготовок с квадратным поперечным сечением (угол 180°) плоскими бойками с различными способами расположения обеспечивают меньший уровень сжимающих напряжений в 2,5 раза (рис. 6, б), чем обкатка четырёхлучевой заготовки с углом 160° в вырезных бойках (рис. 5). Уровень сжимающих напряжений в осевой зоне для рассматриваемых способов обкатки обеспечивает показатель $P\sigma$ в диапазоне $-1,7 \dots -2,2$. Высокий уровень показателя $P\sigma \approx -2,5$ обеспечивает обкатка квадратной заготовки «плашмя» с предварительной степенью обжатия 15 % (рис. 6, линия 4), что объясняется большими величинами обжатия при обкатке до получения заданного диаметра (1265 мм).

Максимальные сжимающие напряжения в осевой зоне при окончательной обкатке обеспечивает угол вогнутости четырёхлучевой заготовки 160° , глубина вогнутости граней 15 % обкатка вырезными бойками с укладкой «на ребро».

Для подтверждения теоретических исследований были проведены экспериментальные исследования, в ходе которых в качестве заготовок были взяты образцы из свинца с содержанием 1 % сурьмы цилиндрической формы с диаметром 40 мм. В осевой зоне высверливалось отверстие диаметром 4 мм, которое имитировало осевую рыхлость слитка.

Последовательность проведения эксперимента: на торцевую поверхность заготовки наносилась координатная сетка, затем со стороны противоположного торца высверливалось глухое отверстие. После этого производилось деформирование полученной заготовки различным инструментом (клиновыми, плоскими и вырезными бойками) и выполнялись замеры изменения поперечного сечения имитируемого дефекта, а также усилия на протяжении процесса протяжки. По полученным данным строились экспериментальные графики изменения поперечного сечения имитируемого дефекта и усилия процесса протяжки. Эксперимент проводился на испытательной машине МС-500 усилием 500 кН.

ВЫВОДЫ

По результатам исследования закрытия осевого дефекта можно сделать вывод, что чем больше угол бойка и глубина вогнутостей граней (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 четырёхлучевых заготовок с точки зрения закрытия осевого дефекта слитка.

Были выделены две схемы, которые могут служить рекомендациями для разработки новых эффективных технологических процессов и имеющие следующие общие параметры: глубина вогнутости граней 25 %, бойки для обкатки – плоские, способ укладки заготовки в плоских бойках перед обкаткой – «на ребро», угол вогнутости граней больше $160^\circ \dots 180^\circ$.

Данные схемы дают возможность получения более качественных и более проработанных по всему объему изделий, в отличии от классических схем ковки валов.

Максимальные сжимающие напряжения (высокий уровень показателя жесткости $P\sigma \approx -(4 \dots 5)$ в осевой зоне при окончательной обкатке обеспечивает угол вогнутости четырёхлучевой заготовки 160° , глубина вогнутости граней 15 % с последующей обкаткой в вырезных бойках с укладкой «на ребро», что объясняется большими величинами обжатия при обкатке до получения заданного диаметра (1265 мм) и подпором боковой поверхности бойков.

Сопоставление экспериментальных и теоретических координатных сеток, полученных после ковки по новым схемам деформирования, позволяет сделать вывод об их схожести, что подтверждает достоверность полученных теоретических результатов, а, следовательно, результатов неравномерности распределения деформаций в теле заготовки, которые были рассмотрены в теоретическом исследовании.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тюрин В. А. Теория и процессы ковки слитков на прессах / В. А. Тюрин. – М. : Машиностроение, 1979. – 240 с.
2. Теория и технология ковки / Л. Н. Соколов, Н. К. Голубятников, В. Н. Ефимов, И. П. Шелаев. – Киев : Выща школа, 1989. – 317 с.
3. Тюрин В. А. Некоторые методы управления качеством металла крупных поковок / В. А. Тюрин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1977. – № 11. – С. 35–39.
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. 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.
6. Теория ковки и штамповки / Е. П. Утесов, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров и др. – М. : Машиностроение, 1992. – 240 с.
7. Унксов Е. П. Исследование напряженного состояния металла при протяжке / Е. П. Унксов, Ю. С. Сафаров, В. И. Гаращенко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1971. – № 1. – С. 3–9.