

УДК 621.735.3

Алиев И. С.
Жбанков Я. Г.
Таган Л. В.

ОСАДКА БЕСПРИБЫЛЬНЫХ СЛИТКОВ ВЫПУКЛЫМИ И ВОГНУТЫМИ ПЛИТАМИ С ОТВЕРСТИЕМ

Применение бесприбыльных слитков дляковки крупных поковок на отечественных и зарубежных предприятиях показывает высокую экономическую эффективность, о чем свидетельствуют результаты внедрения таких технологий на заводе Green Rivier Steel Corp [1]. Здесь в результате применения бесприбыльных слитков был сэкономлен металл, расходовавшийся на прибыльную часть, и увеличен среднегодовой выход годного примерно на 13 %. После чего завод Green Rivier Steel Corp. от слитков с прибылью совершенно отказался. Применение бесприбыльных слитков показало высокую эффективность и на таких предприятиях как НКМЗ, УЗТМ, ДЗМ [2]. В основном из бесприбыльных слитков на этих предприятиях изготавливались полые поковки типа цилиндров и колец. Известна попыткаковки и сплошных поковок из бесприбыльных слитков, так на Ждановском заводе тяжелого машиностроения были отлиты и откованы несколько бесприбыльных слитков. Ковка проводилась с предварительной осадкой бесприбыльного слитка на полом кольце, что позволило избавиться от ликвационного металла в слитке. Как показали расчеты, экономия металла при ковке по такой технологии может достигать 250 кг на 1 т поковки [3]. На «Невском заводе» им. В. И. Ленина применена прогрессивная технологияковки кольца из бесприбыльного слитка. Заменена технологияковки кольца из удлиненного слитка массой 11 т, где выход годного составлял 65 %, после внедренияковки того же кольца из бесприбыльного слитка массой 9,5 т выход годного составил 76 %. На заводе внедрено более 50 действующих технологийковки из бесприбыльных слитков [4].

Целью данной работы является исследование влияния геометрии полых плит для осадки на деформированное состояние заготовки в процессековки бесприбыльных слитков.

Для исследования и разработки правильного технологического процессаковки поковки из бесприбыльного слитка необходимо достаточно точно определить геометрические размеры слитка и, в частности, размеры усадочной раковины.

Объем, глубина и форма усадочной раковины определяются многими факторами, основными из которых являются: тип и форма слитка (уширенный книзу, уширенныйверху, спокойный, кипящий блюминговый, листовой, без утепления прибыли с утеплениемшамотным кирпичом или теплоизолирующим вкладышем), химический состав стали (в основном содержание углерода, который определяет коэффициентусадки стали; условия образования «границы выливаемости» – относительное количество твердой фазы, при которой образуется сплошной скелет сросшихся твердых кристаллов), скорость продвижения «границы выливаемости» в прибыль и тело слитка, зависящие от температуры их поверхностей, находящихся при различных условиях охлаждения [5].

Основные из этих факторов позволяет учитывать инженерная формула для определения глубины усадочной раковины [6, 7] (рис. 1):

$$y = \frac{\alpha \cdot (V + v)}{2 \cdot Q} + \sqrt{\left[\frac{\alpha \cdot (V + v)}{2 \cdot Q} \right]^2 + m^2 \cdot R^2}, \quad (1)$$

где Q – средняя площадь усадочной раковины, мм²;

V , v – объем слитка без прибыли и объем самой прибыли соответственно, мм³;

α – относительный коэффициент объемнойусадки стали при затвердевании;

m – относительная скорость затвердевания металла в прибыли слитка от верхней поверхности;

R – толщина (радиус) слитка, мм.

Исходя из того, что в основном усадочная раковина имеет форму близкую к конусу, о чем свидетельствует работа [7], средняя площадь ее будет вычисляться по следующей зависимости:

$$Q = \frac{\pi}{12} \cdot D_{осн}^2, \quad (2)$$

где $D_{осн}$ – диаметр основания усадочной раковины, который совпадает в большинстве случаев с диаметром прибыли слитка, мм.

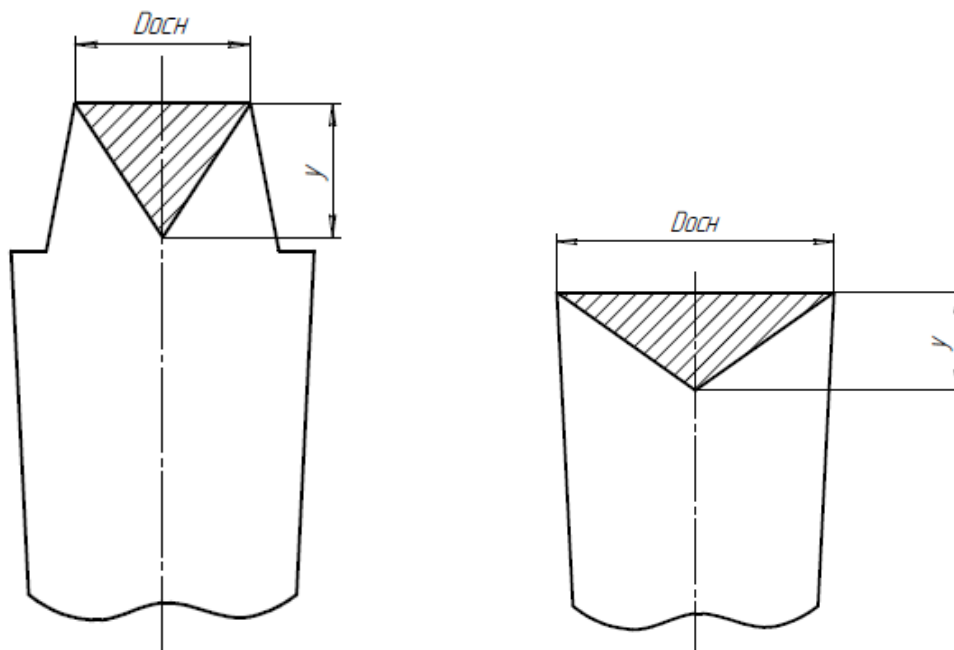


Рис. 1. Схема образования усадочной раковины в обычном кузнечном (а) и бесприбыльном (б) слитках

Относительный коэффициент объемной усадки стали α при затвердевании колеблется от 0,025 (2,5 %) до 0,03 (3 %) для углеродистых сталей и около 0,04 (4 %) для легированных сталей.

Относительная скорость затвердевания металла m в различных работах изменяется от 0,65 до 0,403. Скорость затвердевания металла будет зависеть от многих факторов: от температуры поверхности слитка и его химического состава (концентрации углерода) в различных сечениях. Наихудшим условиям, с точки зрения величины усадочной раковины, будет отвечать относительная скорость затвердевания равная 0,65.

Формулу для расчета глубины усадочной раковины возможно применять и для бесприбыльных слитков, в таком случае она будет иметь несколько иной вид:

$$y = \frac{\alpha \cdot V}{2 \cdot Q} + \sqrt{\left[\frac{\alpha \cdot V}{2 \cdot Q} \right]^2 + m^2 \cdot R^2}. \quad (3)$$

По описанной выше методике произведен расчет абсолютных и относительных (отношение глубины усадочной раковины к длине тела слитка) величин усадочных раковин для бесприбыльных слитков различного тоннажа. Параметры слитков, их размеры брались из [8]

такими же, как и размеры обычных кузнечных слитков, только без прибыльной части. В расчетах принимались наихудшие условия кристаллизации слитка, т. е. объемная усадка 4 % и относительная скорость затвердевания металла 0,65. Результаты расчета представлены в табл. 1.

Экономическая эффективность применения бесприбыльных слитков при производстве крупных поковок различной конфигурации определяет тот факт, что разработка режимовковки слитков, обеспечивающих удаление из слитка некачественного металла, является актуальным. Перспективным представляется удаление усадочной раковины и дефектного металла из тела слитка способами осадки бесприбыльного слитка плитой с отверстием, причем конфигурация плиты может быть различной как плоской (рис. 2, а), вогнутой (рис. 2, б), так и выпуклой (рис. 2, в).

Таблица 1

Параметры расчета величины усадочной раковины

Масса обычного слитка, т	Масса слитка без прибыли, т	Объем слитка, мм ³	Диаметр тела слитка, мм	Высота тела слитка, мм	Средняя площадь усадочной раковины, мм ²	Глубина усадочной раковины, мм	Относительная глубина усадочной раковины	H/D тела слитка
Слитки ПАО «НКМЗ»								
1,6	1,325	168 789 808	435	1 280	49 513,9	225,1	0,176	3,24
3,5	3	382 165 605	570	1 760	85 015,5	295,8	0,168	3,37
4	3,5	445 859 872	620	1 730	100 584,7	308,8	0,178	3,08
6	4,255	542 038 216	648	1 965	109 874,88	331,2	0,168	3,37
7,5	6,057	771 592 356	880	1 375	202 634,66	372,12	0,27	1,66
10	8,215	1 046 496 815	890	1 725	20 7266,2	407,4	0,236	2,01
10,3	8,057	1 026 369 427	985	1 465	253 875,54	411	0,28	1,57
21	17,085	2 176 433 121	1 150	2 170	346 054,2	520,1	0,240	1,96
30	24,4	3 108 280 255	1 265	2 570	418 725,5	585,6	0,228	2,11
45	36,74	4 680 254 777	1 400	2 935	512 866,7	672,8	0,229	2,02
68	55,4	7 057 324 841	1 705	3 155	760 671,5	769,9	0,244	1,92
87	70,93	9 035 668 790	1 800	3 470	847 800,0	835,8	0,241	2
104	84,23	10 729 936 306	1 900	3 900	944 616,7	885,1	0,227	2,13
132	106,9	13 617 834 395	2 100	4 020	1 153 950,0	958,2	0,238	1,97
170	138,70	17 669 426 752	2 226	4 700	1 296 578,2	1045,6	0,222	2,18
Слитки предприятия «Ижорский завод»								
34,5	26,469	3 371 847 134	1 500	2 135	588 750	615,3	0,288	1,55
51	38,8	4 942 675 159	1 720	2 400	774 114,66	701	0,29	1,52
60,6	44,7	5 694 267 516	2 030	2 050	1 078 302,1	773	0,37	1,09
65,3	47,4	6 038 216 561	1 830	2 650	876 295,5	748,3	0,28	1,58
136,5	100,4	12 789 808 917	2 700	2 530	1 907 550	1021,7	0,4	1,01
180	129,5	16 496 815 287	2 760	3 000	1 993 272	1077,66	0,359	1,17

Проведено моделирование осадки бесприбыльного слитка вогнутой плитой с отверстием (рис. 2, в) в программе QFrom-2D [9]. Отверстие в верхней плите принималось 0,4, 0,6 и 0,8 от среднего диаметра тела слитка, угол конусности 140°, 150°, 160° и 180°. Моделировалась осадка слитков с H/D, равным 1, 1,66, 2, 3,3 (слитки 136,5 т, 7,5 т, 10 т и 6 т). Для данной схемы, также как и для предыдущей, задавались: материал слитка сталь 45, исходная температура слитка 1200 °С, коэффициент трения по Зибелю равный 0,4, скорость осадки 10 мм/сек.

По результатам моделирования получены поля распределения интенсивности логарифмических деформаций и средних напряжений по сечению заготовки по ходу осадки (рис. 3, 4).

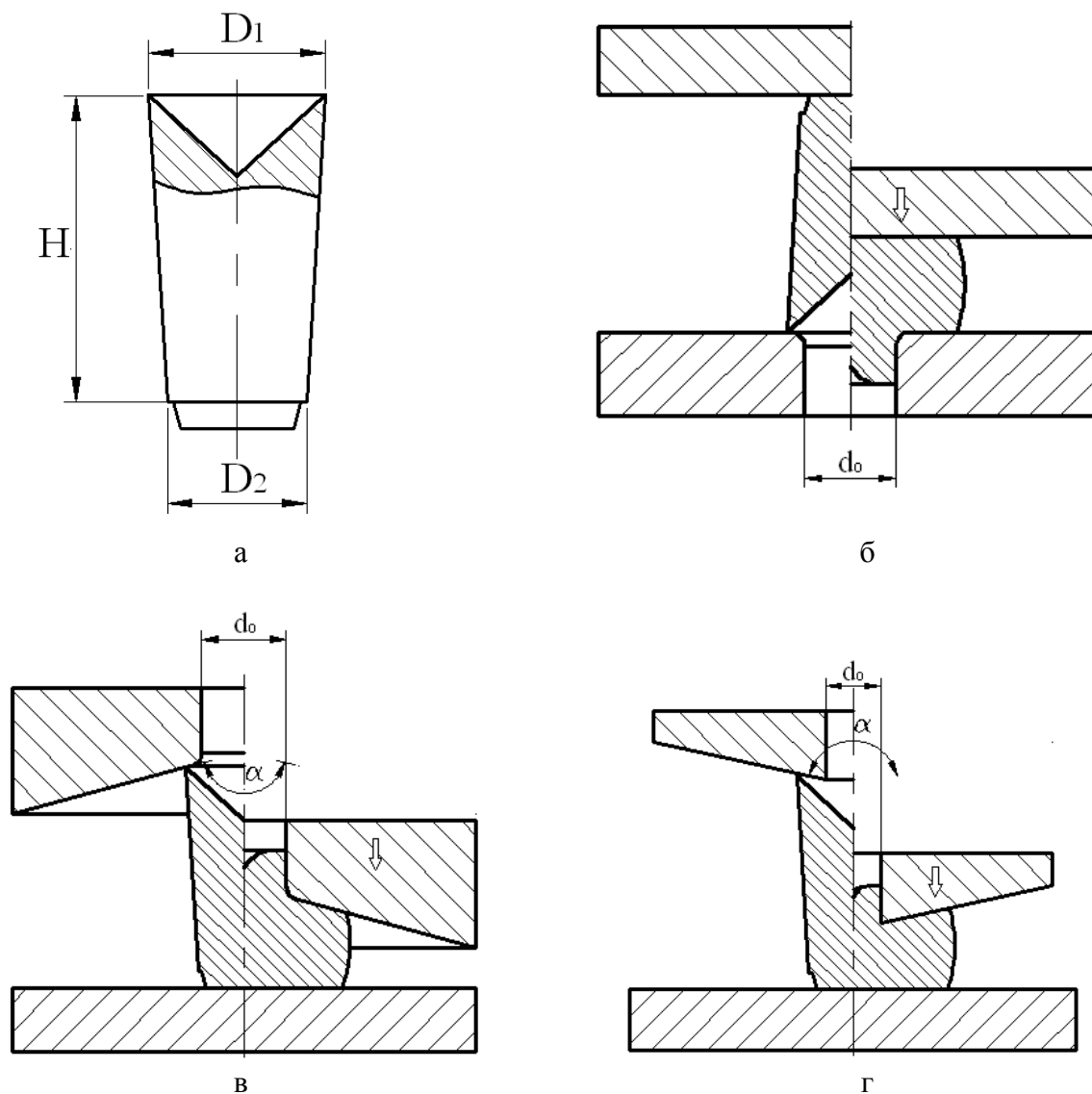


Рис. 2. Способы осадки бесприбыльного слитка (а) на плоской плите с отверстием (б), вогнутой конусной плитой с отверстием (в) и выпуклой конусной плитой с отверстием (г)

Анализ полей распределения деформаций по сечению заготовки позволяет сделать вывод о том, что деформации рассредоточены достаточно однородно по телу заготовки и наибольшие деформации при осадке конусной вогнутой плитой сосредотачиваются непосредственно в центре осаживаемого слитка и в слоях между боковой поверхностью слитка и его центральной частью. Наименьшие деформации сосредоточены в металле, который выдавливается в отверстие плиты и на торце слитка со стороны плоской плиты, что обусловлено наличием большого трения. Сравнение полей распределения деформаций для схемы осадки плоской плитой и вогнутой плитой, показывает, что при одинаковой относительной (высотной) деформации, величины логарифмических деформаций расположенных локально в заготовке больше при осадке вогнутой плитой. Так при осадке плоской плитой с отверстием слитка массой 10 т логарифмические деформации в теле заготовки достигают 1,5–1,6, а при осадке такого же слитка вогнутой плитой они достигают 1,8–2.

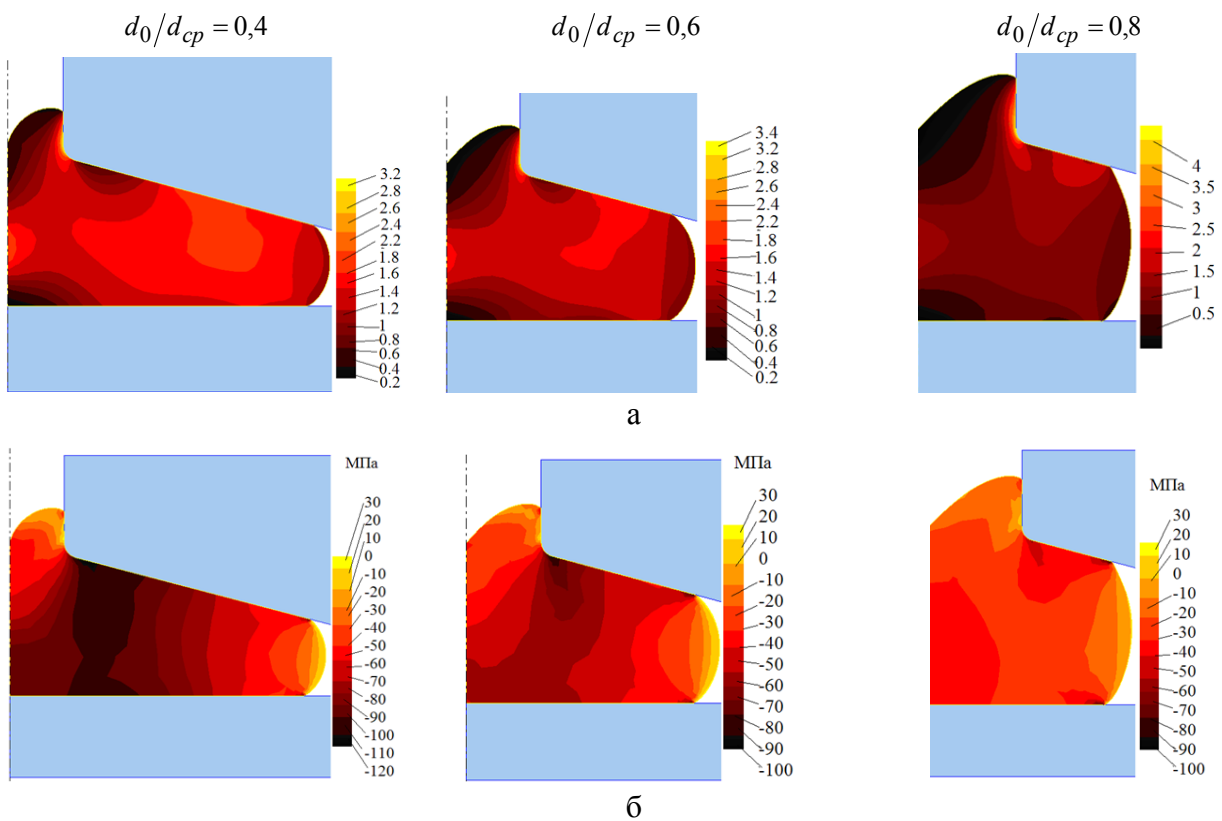


Рис. 3. Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций (а) и средних напряжений (б) по сечению заготовки в процессе осадки слитка массой 10 т без прибыльной части на плите с отверстием и углом конусности 150°

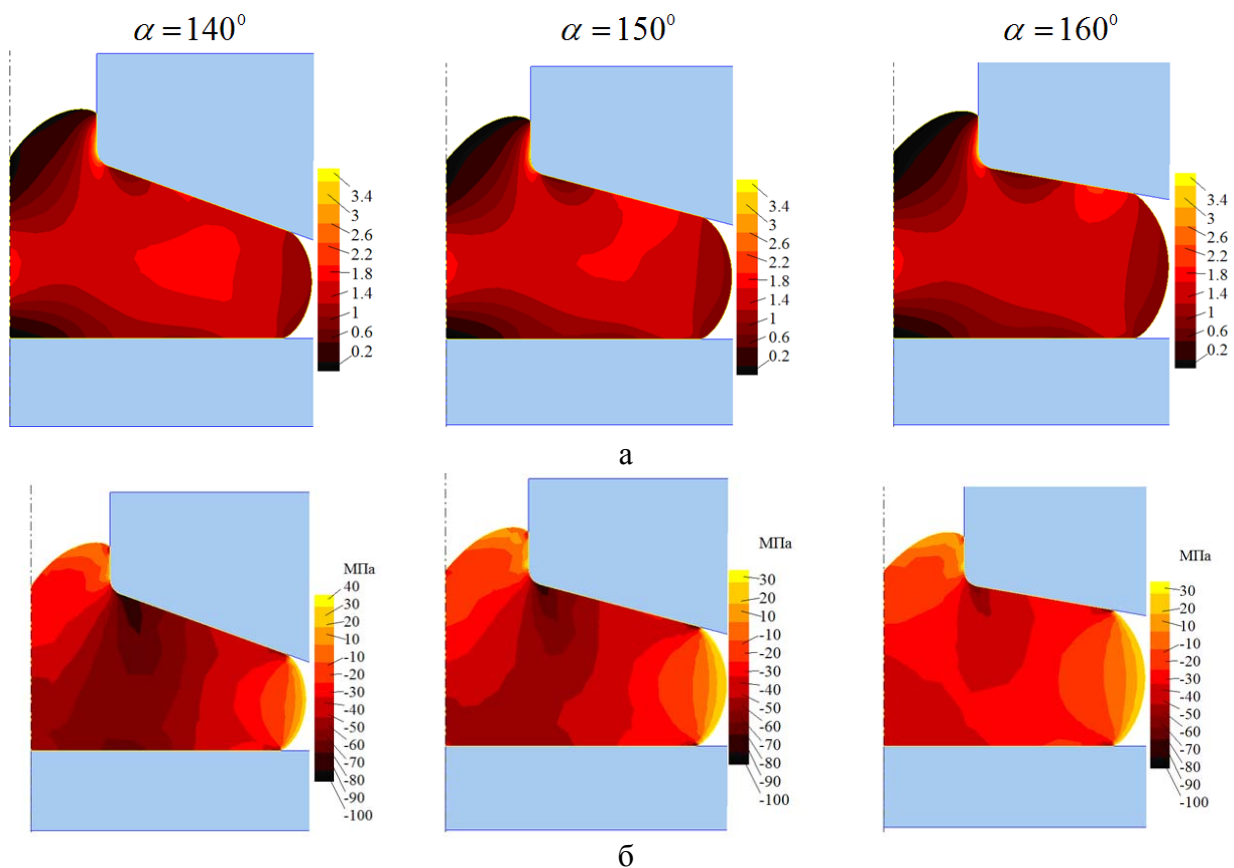


Рис. 4. Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций (а) и средних напряжений (б) по сечению заготовки в процессе осадки слитка массой 10 т без прибыльной части на плите с отверстием, равным 0,6 среднего диаметра тела слитка

Средние напряжения, отражающие схему напряженного состояния, по телу заготовки в ходе осадки также распространены достаточно однородно. Эти напряжения в центре осаживаемой заготовки имеют отрицательное значение, что способствует закрытию внутренних дефектов слитка при осадке. Однако есть зоны со средними напряжениями, имеющими положительное значение, т. е. зоны всестороннего растяжения. Это боковая поверхность осаживаемой заготовки и часть металла, вытесняемого в отверстие. В связи с этим можно сделать заключение о том, что перед осадкой слитка необходимо тщательно подготовить его боковую поверхность, т. е. по возможности удалить с поверхности все трещины и литейные дефекты.

Из рис. 3, 4 видно, что на величину средних напряжений влияет угол конусности плиты, так с увеличением конусности средние напряжения в заготовке увеличиваются. Сравнение полей распределения средних напряжений при осадке вогнутой и плоской плитой показывает, что средние напряжения в заготовке, в основной ее массе, достигают 30 МПа, а при осадке вогнутой плитой с отверстием (угол конусности 140 °) достигают –80 ... –90 МПа, что в 2,5–3 раза больше. Таким образом, схема осадки вогнутой плитой с отверстием более выгодна с точки зрения проработки металла заготовки.

Построены графики зависимости относительной степени осадки слитка, при которой высота усадочной раковины перемещается в отверстие от геометрических параметров инструмента (угла конусности плиты, величины диаметра отверстия) и слитков (отношение высоты слитка к его диаметру). Графики представлены на рис. 5.

Анализ графиков позволяет сделать вывод о том, что с уменьшением величины угла конусности для слитков с любым соотношением высоты к диаметру и при использовании плит с отверстиями любых размеров, относительная степень деформации осадки (при которой вершина усадочной раковины перемещается в отверстие) увеличивается. Также из графиков видно, что с увеличением отверстия плиты величина относительной степени деформации уменьшается. На относительную степень деформации большое влияние оказывает и относительная высота слитка, так наименьшая величина относительной деформации осадки будет при использовании слитка с малым соотношением H/D . Если сравнивать слитки с H/D , равным 1 и 3,3, то относительная степень деформации, при которой вершина усадочной раковины переместится в отверстие плиты, в первом случае на 25 % меньше.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что конусность вогнутых плит не способствует затеканию дефектного металла слитка, находящегося в районе усадочной раковины в отверстие. Кроме того, в случае последующей прошивки заготовки конусность, образованную на торце заготовки, необходимо устранить дополнительной осадкой плоской плитой. Все это не позволяет рекомендовать данный способковки бесприбыльных слитков.

Проведено моделирование схемы осадки бесприбыльного слитка выпуклой плитой с отверстием (рис. 2, г) в программе QForm-2D [9]. Отверстие в верхней плите принималось 0,4, 0,6 и 0,8 от среднего диаметра тела слитка, угол конусности 140 °, 150 ° и 160 °. Моделировалась осадка слитков с H/D равным 1, 1,66, 2, 3,3 (слитки 136,5 т, 7,5 т, 10 т и 6 т). Для данной схемы, также как и для предыдущей, задавались материал слитка сталь 45, исходная температура слитка 1200 °С, коэффициент трения по Зибелю равный 0,4, скорость осадки 10 мм/сек.

По результатам моделирования получены поля распределения интенсивности логарифмических деформаций и средних напряжений по сечению заготовки по ходу осадки (рис. 6–8).

Анализ полей распределения интенсивности логарифмических деформаций позволяет сделать вывод, о том, что наибольшие деформации в заготовке по ходу осадки сосредотачиваются в зоне кромки отверстия выпуклой плиты. Эта зона локальна и ее размеры малы, в основной массе заготовки деформации распределены достаточно равномерно. На равномерность распределения деформации, как видно из рис. 8, оказывает влияние угол конусности плиты с отверстием. С увеличением угла конусности плиты неравномерность распределения

деформаций по сечению заготовки уменьшается, что связано с большей деформацией периферийных слоев заготовки. Минимальные деформации в заготовке по ходу осадки сосредоточены в металле, который выдавливается в отверстие плиты и на торце слитка со стороны плоской плиты, что обусловлено наличием там застойной зоны.

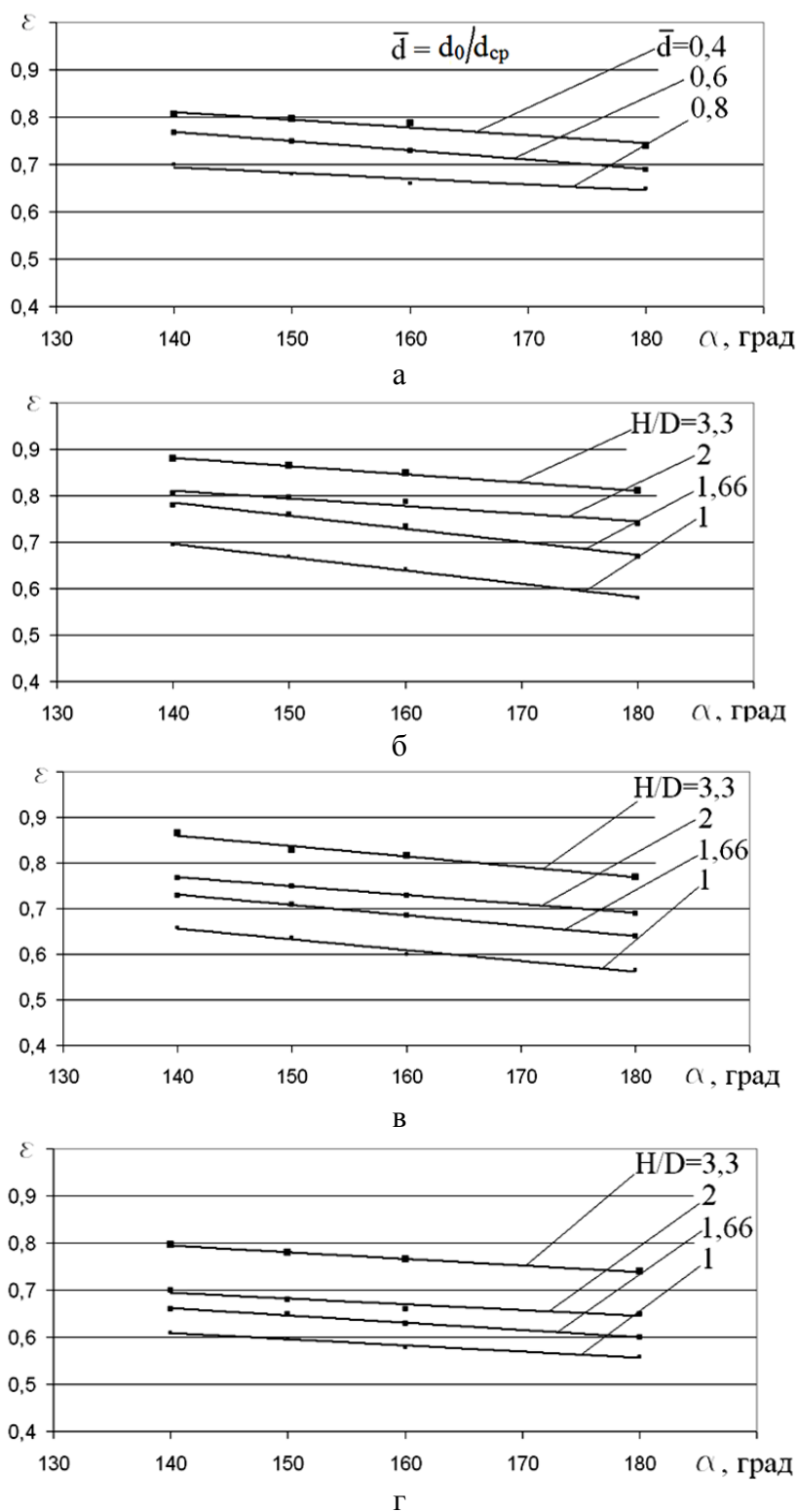


Рис. 5. Графики зависимости относительной степени осадки (отношение хода верхней плиты к высоте слитка), при которой вершина усадочной раковины перемещается в отверстие кольца от угла конусности кольца:

а – $H/D = 2$; б – $d_0/d_{cp} = 0,4$; в – $d_0/d_{cp} = 0,6$; г – $d_0/d_{cp} = 0,8$

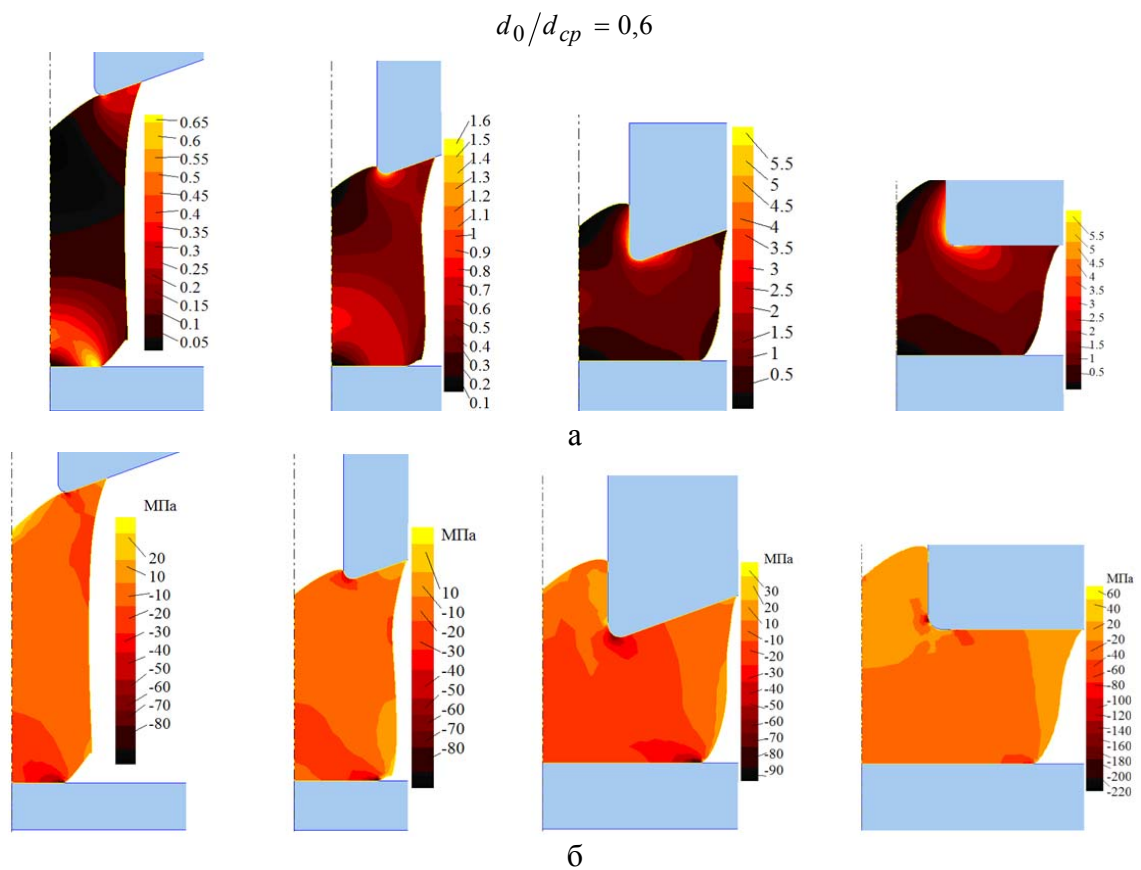


Рис. 6. Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций (а) и средних напряжений МПа (б) по сечению заготовки в процессе осадки слитка массой 10 т выпуклой плитой с отверстием (угол конусности 140 °)

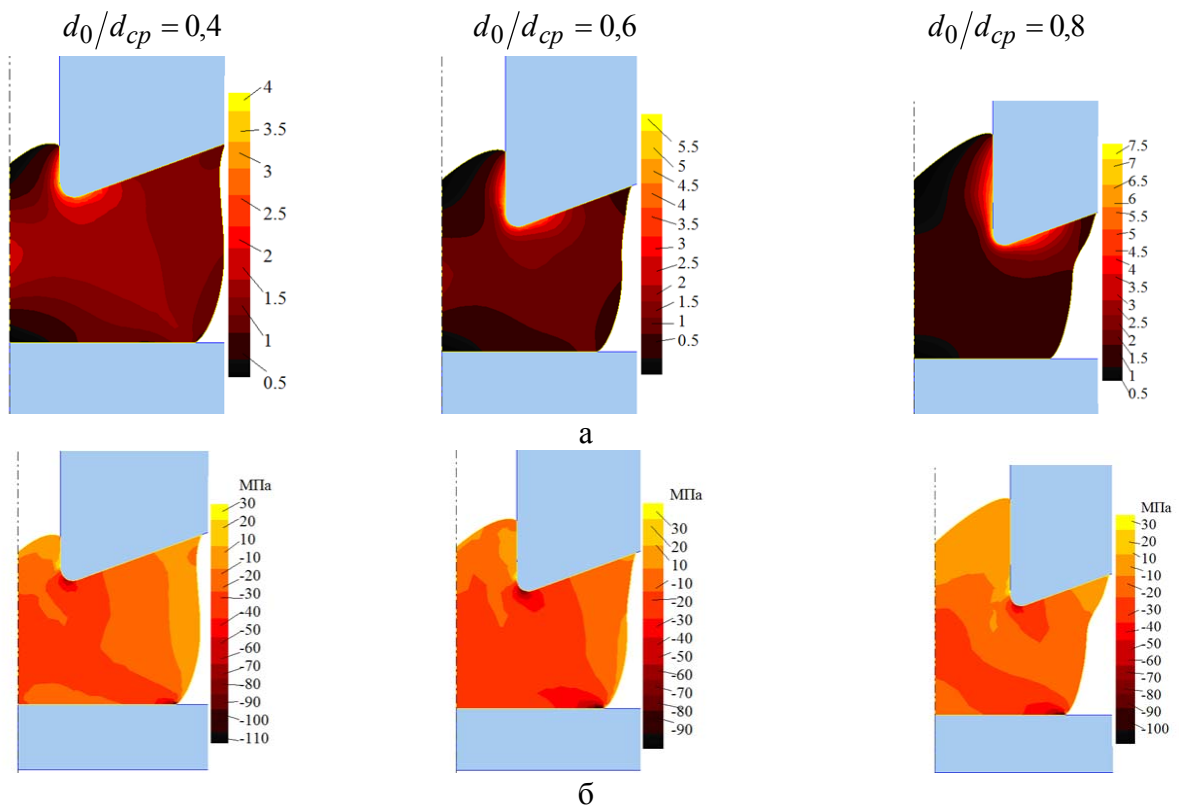


Рис. 7. Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций (а) и средних напряжений (б) по сечению заготовки в процессе осадки слитка массой 10 т без прибыльной части выпуклой плитой с отверстием (угол конусности 140 °)

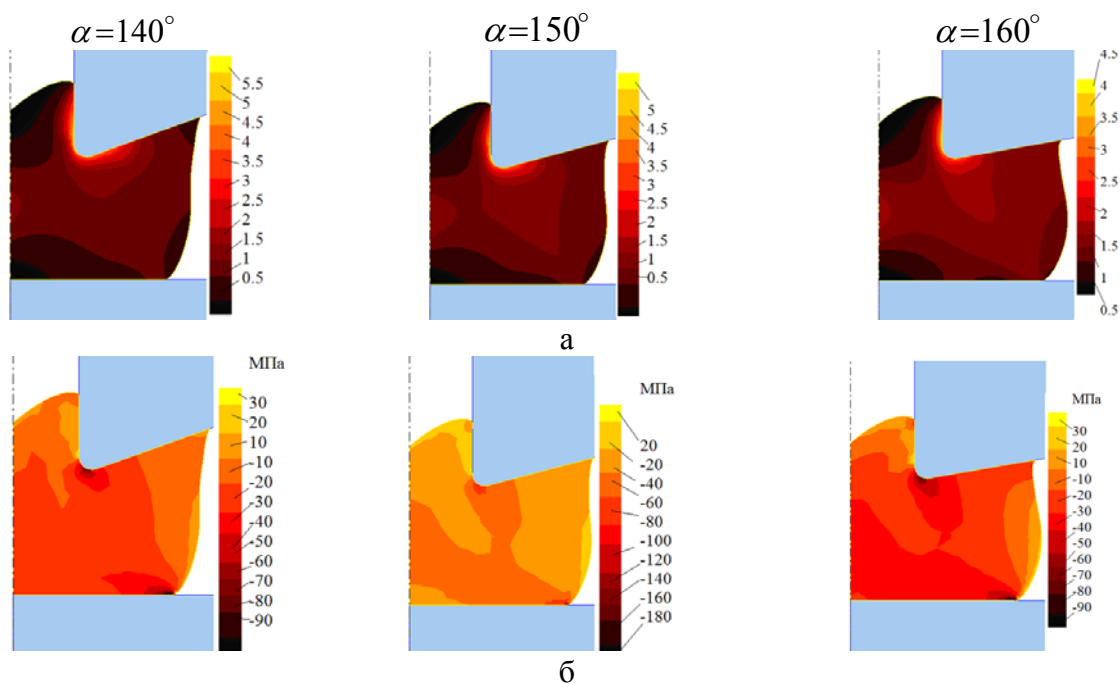


Рис. 8. Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций (а) и средних напряжений (б) по сечению заготовки в процессе осадки слитка массой 10 тон без прибыльной части выпуклой плитой с отверстием, равным 0,6 среднего диаметра тела слитка

Сравнение полей распределения деформаций по сечению слитка при осадке для различных схем осадки показывает, что величина деформаций в заготовке, полученной осадкой выпуклой плитой, меньше деформаций в заготовке, полученной осадкой плоской плитой с отверстием, и намного меньше, чем в случае осадки вогнутой плитой. Так при осадке плоской плитой с отверстием слитка массой 10 тон логарифмические деформации в теле заготовки достигают 1,5–1,6, при осадке такого же слитка вогнутой плитой они достигают 1,8–2, а при осадке выпуклой плитой они достигают в среднем 1,5 единиц.

Средние напряжения в ходе осадки по телу заготовки распространены достаточно однородно. По ходу осадки средние напряжения имеют отрицательное значение в центре заготовки, что способствует закрытию внутренних дефектов слитка при осадке. Однако есть зоны с напряжениями, имеющими положительное значение, т. е. зоны всестороннего растяжения. Это боковая поверхность осаживаемой заготовки и незначительная часть металла, вытесняемого в отверстие.

Из рис. 7, 8 видно, что на величину средних напряжений не оказывают существенное влияние геометрия инструмента (угол конусности и диаметр отверстия). Сравнение полей распределения средних напряжений при осадке вогнутой, плоской и выпуклой плитой показывает, что средние напряжения в заготовке, в основной ее массе, при осадке плоской плитой и выпуклой плитой равны и достигают -30 МПа, что в 2,5–3 раза меньше, чем при осадке вогнутой плитой.

Построены графики зависимости относительной степени осадки слитка, при которой высота усадочной раковины перемещается в отверстие от геометрических параметров инструмента (угла конусности плиты, величины диаметра отверстия) и слитков (отношение высоты слитка к его диаметру). Графики представлены на рис. 9.

Анализ графиков позволяет сделать вывод о том, что с уменьшением величины угла конусности для слитков с любым соотношением высоты к диаметру и при использовании плит с отверстиями любых размеров относительная степень деформации осадки (при которой вершина усадочной раковины перемещается в отверстие) уменьшается. Также из графиков видно, что с увеличением отверстия плиты величина относительной степени деформации уменьшается. На относительную степень деформации большое влияние оказывает и относительная высота слитка, так наименьшая величина относительной деформации осадки будет

при использовании слитка с малым соотношением H/D . Если сравнивать слитки с H/D равным 1 и 3.3, то относительная степень деформации, при которой вершина усадочной раковины переместится в отверстие плиты, в первом случае на 25 % меньше.

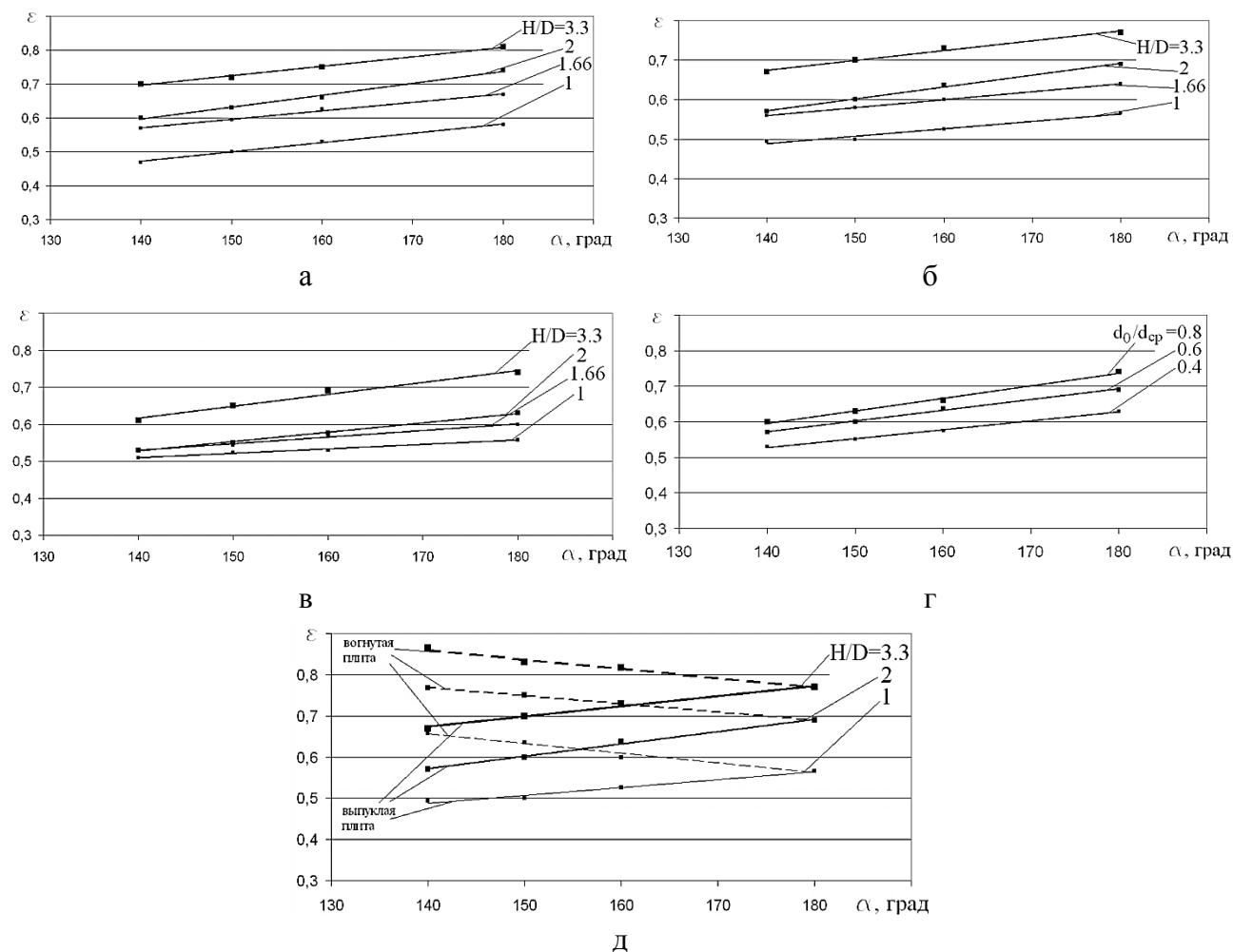


Рис. 9. Графики зависимости относительной степени осадки, при которой вершина усадочной раковины перемещается в отверстие кольца, от угла конусности кольца:

а – $d_0/d_{cp} = 0,4$; б – $d_0/d_{cp} = 0,6$; в – $d_0/d_{cp} = 0,8$; г – $H/D = 2$; д – $d_0/d_{cp} = 0,6$

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что конусность выпуклых плит существенно влияет на перемещение дефектного металла слитка, находящегося в районе усадочной раковины, в отверстие плиты. Это позволяет рекомендовать данный способковки с последующей правкой плоской плитой с отверстием.

ВЫВОДЫ

Особенностьюковки бесприбыльных слитков для повышения качествапоковки является необходимость удаления из тела слитка некачественного металла. Удалить дефектный металл из тела слитка возможно осадкой бесприбыльного слитка на плите с отверстием. Рассмотрены схемы осадки бесприбыльного слитка вогнутой и выпуклой конусной плитой с отверстием. Проведено сравнение показателей напряженно-деформированного состояния слитков в процессе их осадки плоской, вогнутой и выпуклой плитой с отверстием.

Установлено, что по ходу осадки конусной вогнутой плитой с отверстием наименее проработанной зоной слитка является часть металла под усадочной раковинной, там сосредоточены самые малые деформации. В среднем, по телу осаженой заготовки деформации сосредоточены достаточно равномерно. Определили, что конусность вогнутых плит не способствует затеканию дефектного металла слитка, находящегося в районе усадочной раковины,

в отверстие. Относительная степень деформации при осадке, при которой вершина усадочной раковины перемещается в отверстие плиты, здесь больше, чем при осадке слитка плоской плитой с отверстием.

Сравнение полей распределения деформаций по сечению слитка при осадке, для различных схем осадки, показывает, что величина деформаций в заготовке, полученной осадкой выпуклой плитой, меньше деформаций в заготовке, полученной осадкой плоской плитой с отверстием, и намного меньше, чем в случае осадки вогнутой плитой. Так при осадке плоской плитой с отверстием слитка массой 10 т логарифмические деформации в теле заготовки достигают 1,5–1,6, при осадке такого же слитка вогнутой плитой они достигают 1,8–2, а при осадке выпуклой плитой они достигают в среднем 1,5 единиц.

Сравнение полей распределения средних напряжений при осадке вогнутой, плоской и выпуклой плитой показывает, что средние напряжения в заготовке, в основной ее массе, при осадке плоской плитой и выпуклой плитой равны и достигают –30 МПа, что в 2,5–3 раза меньше, чем при осадке вогнутой плитой.

При осадке бесприбыльного слитка выпуклой конусной плитой конусность выпуклых плит существенно влияет на перемещение дефектного металла слитка, находящегося в районе усадочной раковины, в отверстие плиты. Данную схему можно рекомендовать дляковки сплошных поковок из бесприбыльных, т. к. относительная степень деформации при осадке бесприбыльного слитка, при которой вершина усадочной раковины перемещается в отверстие плиты, здесь наименьшая из трех рассматриваемых схем. При угле конусности 140° , относительном диаметре отверстия 0,6 и осадке слитка с соотношением высоты к диаметру 2 степень деформации составляет 0,57, что на 20 % меньше, чем при осадке плоской плитой.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головнев И. Ф. *Свободная ковка крупных поковок за рубежом* / И. Ф. Головнев // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 1959. – № 9. – С. 42–47.
2. *Изготовление полых поковок из бесприбыльных слитков новой конфигурации* / Л. Н. Соколов, А. Д. Кирицев, С. Я. Скобло, Р. Г. Полоцкий и др. // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 1967. – № 3. – С. 12–15.
3. Соколов Л. Н. *О возможности получения сплошных поковок из бесприбыльных слитков* / Л. Н. Соколов, О. Р. Ляшко, В. К. Олейниченко // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 1974. – № 10. – С. 4–5.
4. Этин И. З. *Опыт внедрения малоотходной технологииковки в условиях ПО «Невский завод» им. В. И. Ленина* / И. З. Этин, В. П. Колесов // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 1983. – № 9. – С. 4–6.
5. Казанцев Е. И. *Энергосберегающая технология нагрева слитков* / Е. И. Казанцев, Е. М. Котляревский, А. В. Баженов, И. С. Заваров. – М. : *Металлургия*, 1992. – 176 с.
6. Гуляев Б. Б. *О расчете утепленных прибылей* / Б. Б. Гуляев // *Труды НТО ЧМ*. – М. : *Металлургиздат*, 1955. – 258 с.
7. Дюдкин Д. А. *Усадочные раковины в стальных слитках и заготовках* / Д. А. Дюдкин, Л. И. Крупман, Д. М. Максименко. – М. : *Металлургия*, 1983. – 136 с.
8. *Ковка и штамповка: справочник. В 4 т. Т. 1.* / [под ред. Е. И. Семенова и др.]. – М. : *Машиностроение*, 1985. – 568 с.
9. *Применение способа осадки слитков кольцами в процессахковки валов* / И. С. Алиев, О. Е. Марков, М. В. Олешко, В. Н. Злыгорев // *Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов*. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 2 (23). – С. 94–98.

Алиев И. С. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. ОМД ДГМА;

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

Таган Л. В. – аспирант ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: omd@dgma.donetsk.ua

Статья поступила в редакцию 10.02.2012 г.