

УДК 621.735.3

Алиев И. С.
Жбанков Я. Г.
Таган Л. В.

ОСАДКА БЕСПРИБЫЛЬНЫХ СЛИТКОВ НА ПЛИТЕ С ОТВЕРСТИЕМ

Современное производство предъявляет высокие требования к технологиям изготовления продукции различного вида. Технологии должны обеспечивать одновременно и высокое качество деталей и заготовок, и низкий уровень расходов на их производство. Все предприятия стремятся к разработке и внедрению таких технологий. Так, например, заводом Green Rivier Steel Corp. был разработан способ дляковки поковок ответственного назначения (моторостроения, авиации, артиллерии и т. д.). Способ основан на ковке бесприбыльных слитков. Проведены экспериментальные исследования на шести сталеплавильных заводах США, которые начинались в 1933 г. Исследовано 22000 т стали на слитках массой от 4 кг до 2 т. Экспериментальные исследования заключались в следующем. Испытывалась сталь разного химического состава: углеродистая с содержанием углерода от 0,12 до 1,4 % и легированная разных марок, включая сталь с содержанием вольфрама 18 %. Сущность процесса заключается в выдавливании вверх некачественной (ликвационной) зоны бесприбыльного слитка, которая в дальнейшем удаляется (рис. 1). Для осуществления данного процесса требуется специальная оснастка, причем, для слитков различных размеров инструмент должен быть разным. Этот способ был внедрен впервые в 1954 г. И за два года после его внедрения было выпущено 254000 т бесприбыльных слитков. В результате был сэкономлен металл, расходовавшийся на прибыльную часть, и увеличен среднегодовой выход годного примерно на 13 %. Впоследствии завод Green Rivier Steel Corp. от слитков с прибылью совершенно отказался [1].

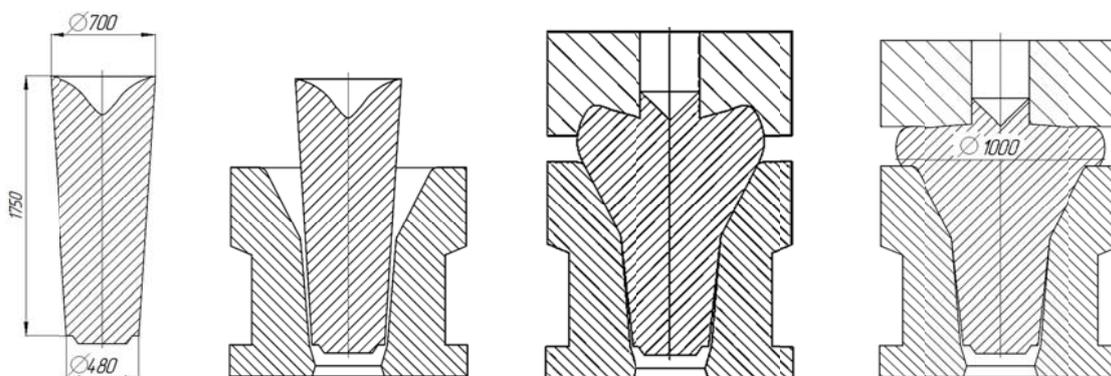


Рис. 1. Схемаковки бесприбыльного слитка в специальном кузнечном инструменте на заводе Green Rivier Steel Corp.

Использовались бесприбыльные слитки и на таких предприятиях как ПАО «НКМЗ», «УЗТМ», «Днепропетровский завод металлургического оборудования» [2]. В основном из бесприбыльных слитков на этих предприятиях изготавливались полые поковки типа цилиндров и колец. Известна ковка и сплошных поволоков из бесприбыльных слитков, так на Ждановском заводе тяжелого машиностроения были отлиты и откованы несколько бесприбыльных слитков. Ковка проводилась с предварительной осадкой бесприбыльного слитка на полое кольцо, 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 была применена прогрессивна технологияковки кольца из бесприбыльного слитка. Ранее на заводе использовалась ковка кольца из

удлиненного слитка массой 11 т и 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 определение параметровусадочной раковины в бесприбыльных слитках и, используя полученные данные, изучение процессаковки бесприбыльных слитков с использованием процессаосадки слитка на плите с отверстием.

Объем, глубина и формаусадочной раковины зависит от следующих факторов: типа и формы слитка (уширенный книзу, уширенныйкверху, спокойный, кипящий блюминговый, листовой, без утепления прибыли с утеплением шамотным кирпичом или теплоизолирующим вкладышем); химического состава стали (в основном содержания углерода, который определяет коэффициент усадки стали, условия образования «границы выливаемости» – относительное количество твердой фазы, при котором образуется сплошной скелет сросшихся твердых кристаллов); скорости продвижения границы выливаемости в прибыль и тело слитка, зависящих от температуры их поверхностей, находящихся при различных условиях охлаждения [5].

Существует большое разнообразие численных методов расчета величиныусадочной раковины в слитке, однако все они достаточно громоздки. В связи с этим целесообразным является применение инженерного метода расчета ее величины.

По известной методике [6, 7] формула для определения глубиныусадочной раковины выглядит следующим образом (рис. 2):

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

где Q – средняя площадьусадочной раковины, мм²; V , v – объем слитка без прибыли и объем самой прибыли соответственно, мм³; α – относительный коэффициент объемной усадки стали при затвердевании; m – относительная скорость затвердевания металла в прибыли слитка от верхней поверхности; R – толщина (радиус) слитка, мм.

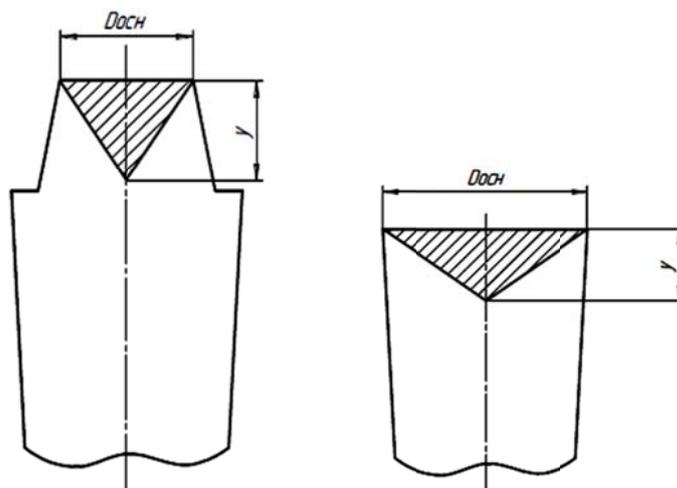


Рис. 2. Схема образованияусадочной раковины в обычном кузнечном (а) и бесприбыльном (б) слитках

Исходя из того, что в основномусадочная раковина имеет форму близкую к конусу, о чем свидетельствует работа [7] (рис. 3), 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.

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. Более точный коэффициент усадки можно определить по табл. 1.

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:

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

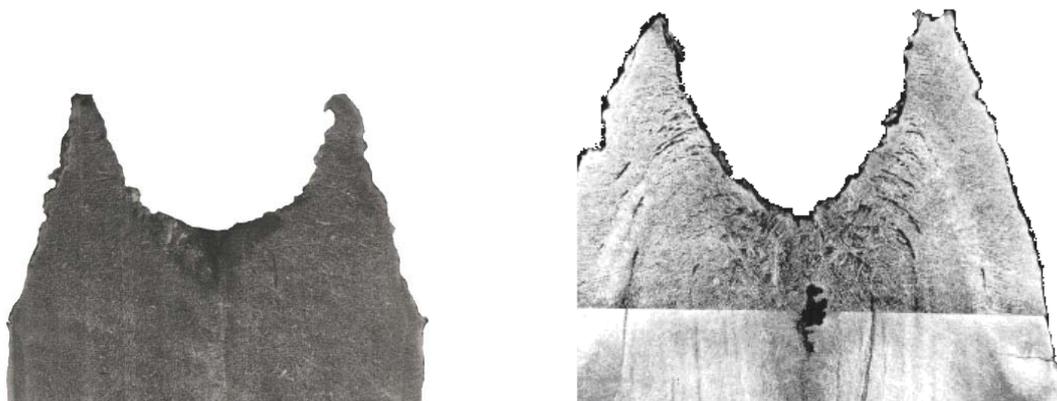


Рис. 3. Усадочная раковина, образовавшаяся в прибыльной части слитка массой 18 т (а) и 27 т (б)

Таблица 1

Коэффициенты усадки при затвердевании и остывании стали

Содержание углерода, %	При охлаждении жидкой стали на 100 °С	При затвердевании	Общая	Содержание углерода, %	При охлаждении жидкой стали на 100 °С	При затвердевании	Общая
0,10	1,50	3,12	4,62	0,60	1,62	4,04	5,66
0,20	1,50	3,39	4,89	0,70	1,62	4,08	5,70
0,30	1,59	3,72	5,31	0,80	1,68	4,05	5,73
0,40	1,59	4,03	5,62	0,90	1,68	4,02	5,70
0,50	1,62	4,13	5,75	1,00	1,75	3,90	5,65

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. 2.

По результатам расчетов построена графическая зависимость относительной глубины усадочной раковины, образующейся после затвердевания жидкой стали в изложнице, от отношения высоты тела слитка к его среднему диаметру (рис. 4).

Таблица 2

Параметры расчета величины усадочной раковины

Масса обычно-го 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	168789808	435	1280	49513,9	225,1	0,176	3,24
3,5	3	382165605	570	1760	85015,5	295,8	0,168	3,37
4	3,5	445859872	620	1730	100584,7	308,8	0,178	3,08
6	4,255	542038216	648	1965	109874,88	331,2	0,168	3,37
7,5	6,057	771592356	880	1375	202634,66	372,12	0,27	1,66
10	8,215	1046496815	890	1725	207266,2	407,4	0,236	2,01
10,3	8,057	1026369427	985	1465	253875,54	411	0,28	1,57
21	17,085	2176433121	1150	2170	346054,2	520,1	0,240	1,96
30	24,4	3108280255	1265	2570	418725,5	585,6	0,228	2,11
45	36,74	4680254777	1400	2935	512866,7	672,8	0,229	2,02
68	55,4	7057324841	1705	3155	760671,5	769,9	0,244	1,92
87	70,93	9035668790	1800	3470	847800,0	835,8	0,241	2
104	84,23	10729936306	1900	3900	944616,7	885,1	0,227	2,13
132	106,9	13617834395	2100	4020	1153950,0	958,2	0,238	1,97
170	138,70	17669426752	2226	4700	1296578,2	1045,6	0,222	2,18
Слитки предприятия «Ижорский завод»								
34,5	26,469	3371847134	1500	2135	588750	615,3	0,288	1,55
51	38,8	4942675159	1720	2400	774114,66	701	0,29	1,52
60,6	44,7	5694267516	2030	2050	1078302,1	773	0,37	1,09
65,3	47,4	6038216561	1830	2650	876295,5	748,3	0,28	1,58
136,5	100,4	12789808917	2700	2530	1907550	1021,7	0,4	1,01
180	129,5	16496815287	2760	3000	1993272	1077,66	0,359	1,17

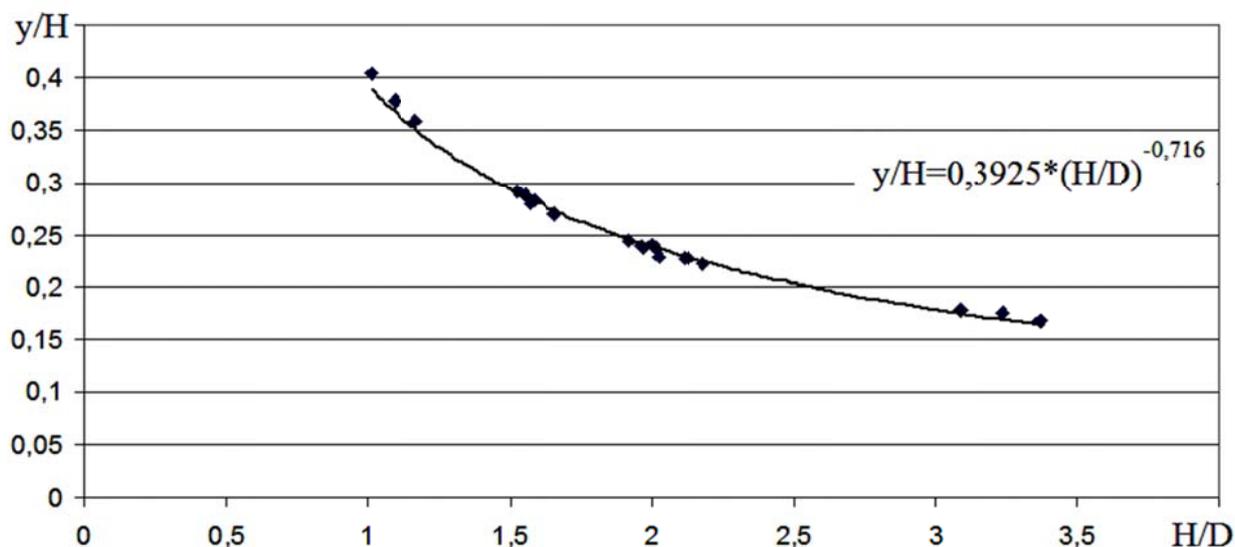


Рис. 4. График зависимости относительной высоты усадочной раковины от относительной высоты тела слитка

Из рис. 4 четко видно, что при увеличении относительной высоты тела слитка относительная глубина усадочной раковины уменьшается. В слитках с соотношением высоты к диаметру близкому к 3–3,5 глубина усадочной раковины не достигает 20 % от высоты тела слитка, а в укороченных слитках с отношением высоты тела слитка к его среднему диаметру близкому к 1 глубина усадочной раковины достигает 40 % от высоты тела слитка. По результатам обработки расчетных данных получена математическая зависимость относительной глубины усадочной раковины от относительной высоты тела слитка. Данную зависимость необходимо учитывать при разработке технологических процессовковки крупных паковок из бесприбыльных слитков.

Из-за рентабельности применения бесприбыльных слитков при производстве крупных поковок различной конфигурации следует, что разработка режимовковки слитков, обеспечивающих удаление из слитка некачественного металла, является актуальной. Как показано в работе [9], удаление усадочной раковины и части некачественного металла возможно осуществлять обычной протяжкой, регулируя при этом величину подачи и обжатий.

Перспективным представляется удаление усадочной раковины и дефектного металла из тела слитка способами осадки бесприбыльного слитка плитой с отверстием, причем конфигурация плиты может быть как плоской (рис. 5, а), вогнутой (рис. 5, б), так и выпуклой (рис. 5, в)

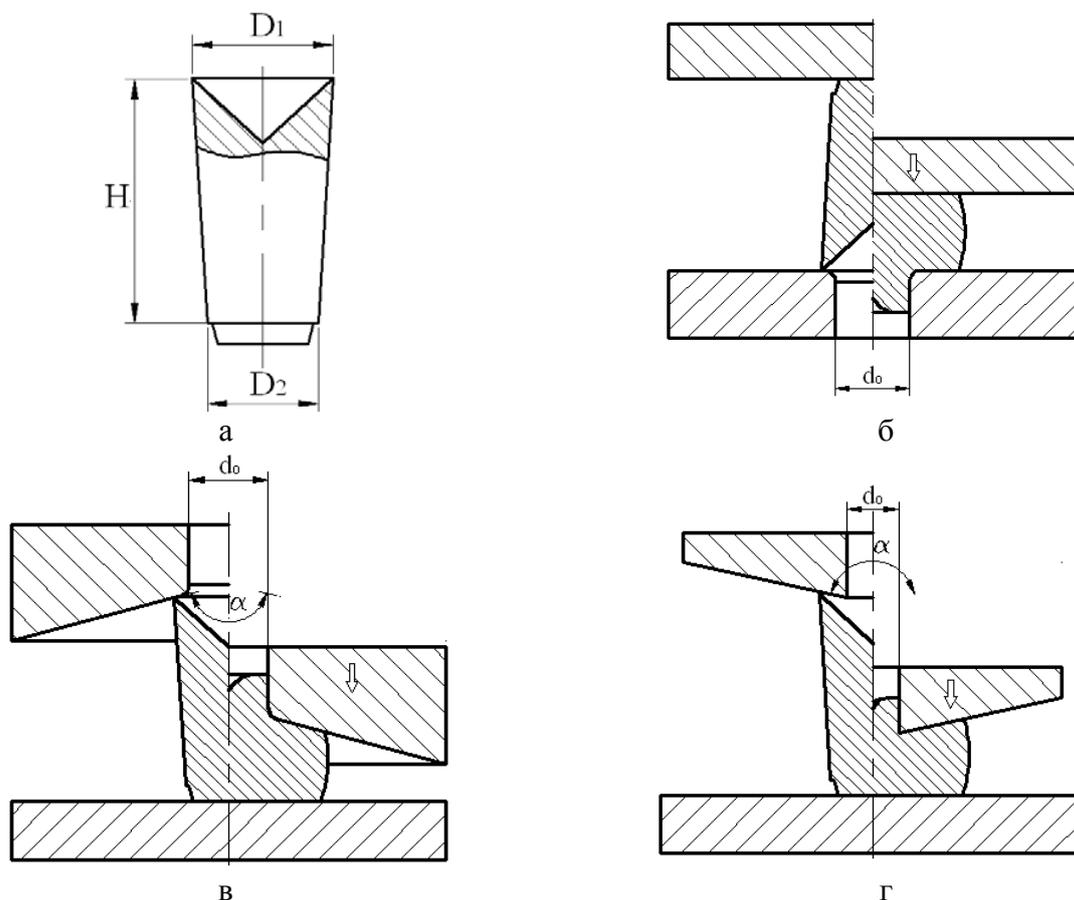


Рис. 5. Способы осадки бесприбыльного слитка (а) на плоской плите с отверстием (б), вогнутой конусной плитой с отверстием (в) и выпуклой конусной плитой с отверстием (г)

В программе QForm-2D проведено моделирование процесса осадки бесприбыльных слитков с усадочной раковинной на плоской плите с отверстием [10]. Моделировалась осадка слитков ПАО «НКМЗ» с соотношением высоты тела слитка к среднему диаметру 3–3,5 (слитки массой 1,6, 3,5 и 6 т), 2–2,1 (слитки массой 10, 104, 170 т) и 1,5–1,6 (слитки массой 7,5 и 10,3 т) и предприятия «Ижорский завод» с соотношением высоты тела слитка к его

среднему диаметру 1–1,1 (слитки массой 6,6, 136,5 и 180 т) и 1,5–1,6 (слиток массой 65,3 т). Размеры слитков брались из [8]. Параметры усадочной раковины принимались из расчетов, приведенных выше. Материал слитков задавался сталь 45, температура слитка 1200 С, скорость осадки 10 мм/с, константа поверхности по Леванову принималась равной 0,8, что равнозначно коэффициенту пластического трения Зибеля 0,4.

Каждый слиток осаживали на плитах с относительным отверстием (отношение диаметра отверстия плиты d_0 к среднему диаметру слитка $d_{cp} = (D_1 + D_2)/2$) равным 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,7, 0,8.

В результате моделирования получены поля распределения интенсивности логарифмических деформаций и среднего напряжения по сечению слитков в процессе осадки. По ходу осадки слитка с усадочной раковиной на плите с отверстием видно, что на первом этапе осадки усадочная раковина раскрывается и в области ее вершины действуют растягивающие напряжения, что может негативно сказаться на качестве заготовки и может привести к зарождению и распространению трещины в тело слитка. Напряженное состояние изменяется от всестороннего неравномерного растяжения к всестороннему неравномерному сжатию в момент вытекания металла слитка с усадочной раковиной в отверстие плиты. Это наблюдается при осадке слитков различных размеров (рис. 6–9).

Проводя анализ полей распределения логарифмических деформаций, можно заметить, что по ходу осадки наименее проработанной зоной слитка является часть металла под усадочной раковиной, там сосредоточены самые малые деформации. Вдобавок к этому, металл под усадочной раковиной наименее качественный, что обуславливает необходимость его удаления. Часть некачественного металла из усадочной раковины в процессе осадки оказывается на торце осаживаемой заготовки, что должно быть учтено при составлении чертежа поковки и на торец поковки, который будет соответствовать торцу осаживаемой заготовки, с прибыльной стороны должен быть назначен повышенный припуск.

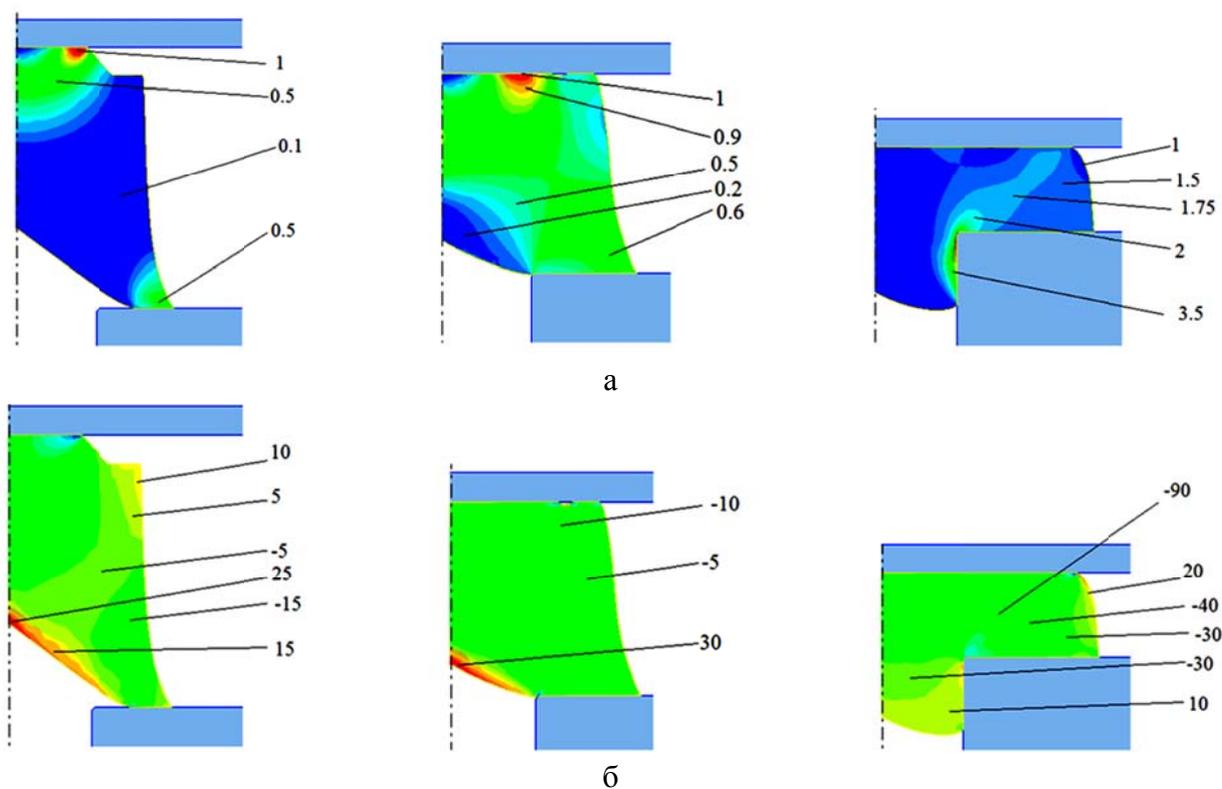


Рис. 6. Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций (а) и средних напряжений, МПа (б) по сечению заготовки в процессе осадки слитка массой 136,5 т без прибыльной части на плите с отверстием диаметром равным 0,6 среднего диаметра тела слитка

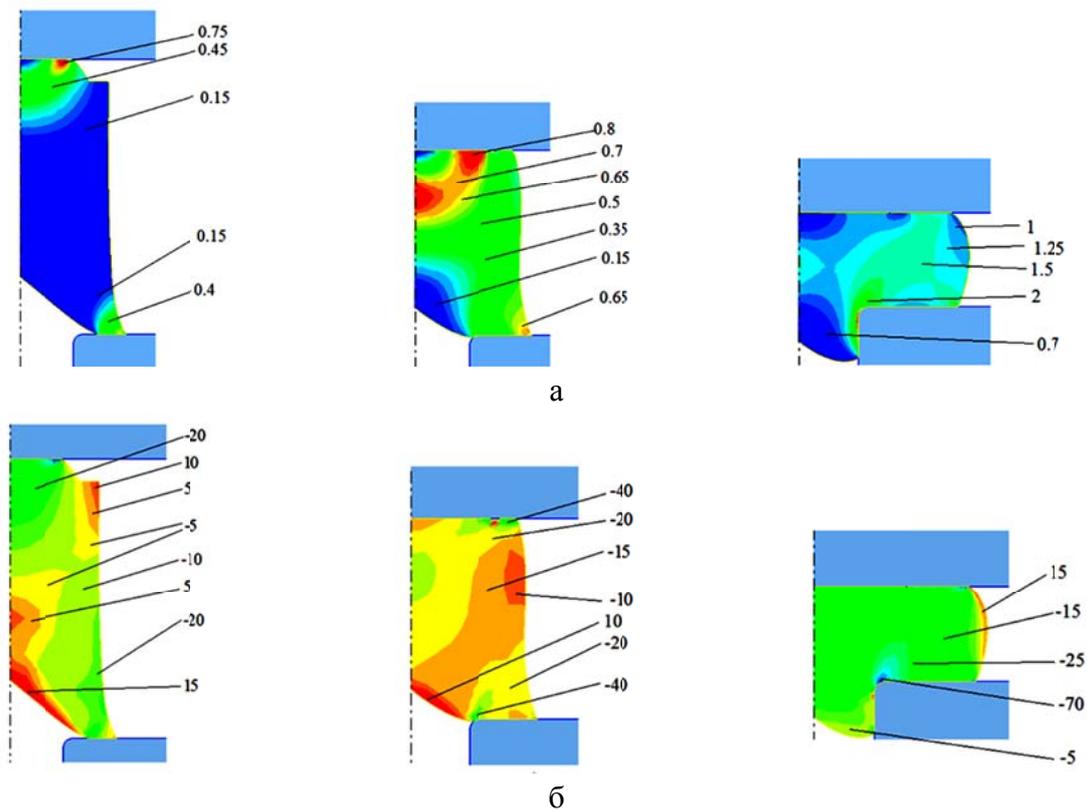


Рис. 7. Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций (а) и средних напряжений, МПа (б) по сечению заготовки в процессе осадки слитка массой 10,3 т без прибыльной части на плите с отверстием диаметром равным 0,6 среднего диаметра тела слитка

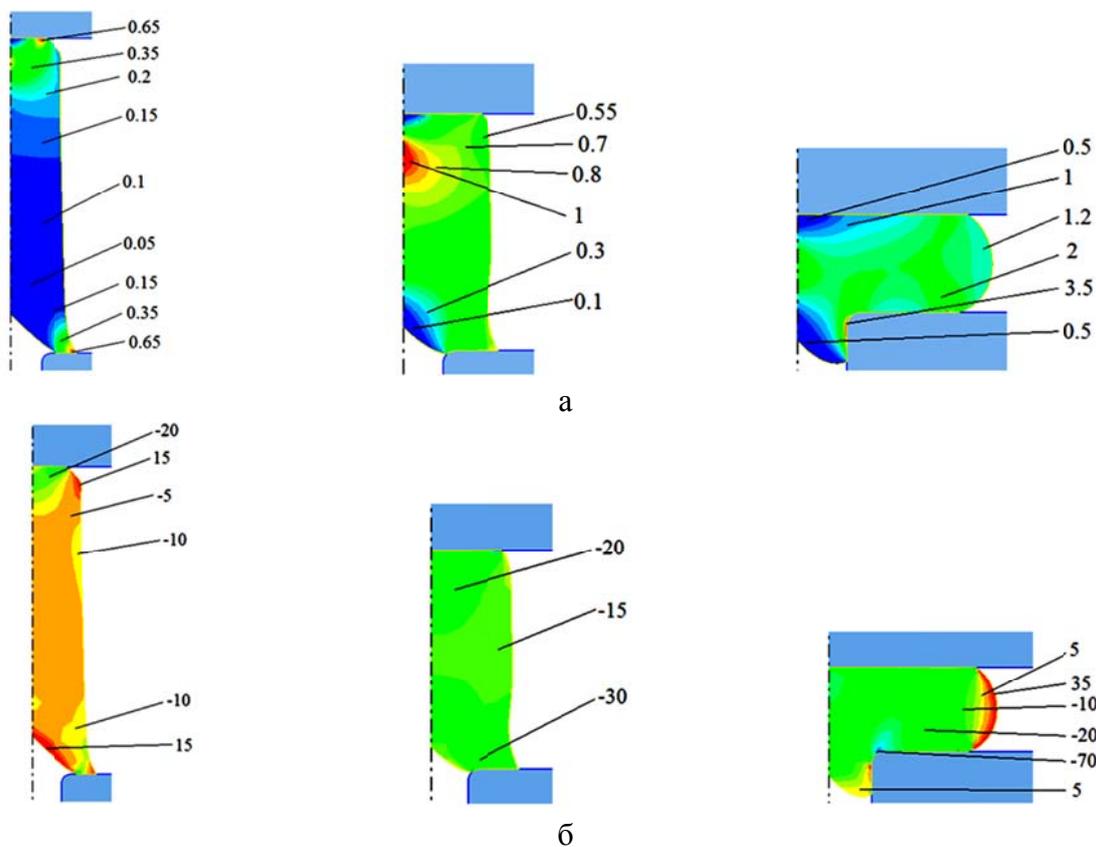


Рис. 8. Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций (а) и средних напряжений, МПа (б) по сечению заготовки в процессе осадки слитка массой 6 т без прибыльной части на плите с отверстием диаметром равным 0,6 среднего диаметра тела слитка

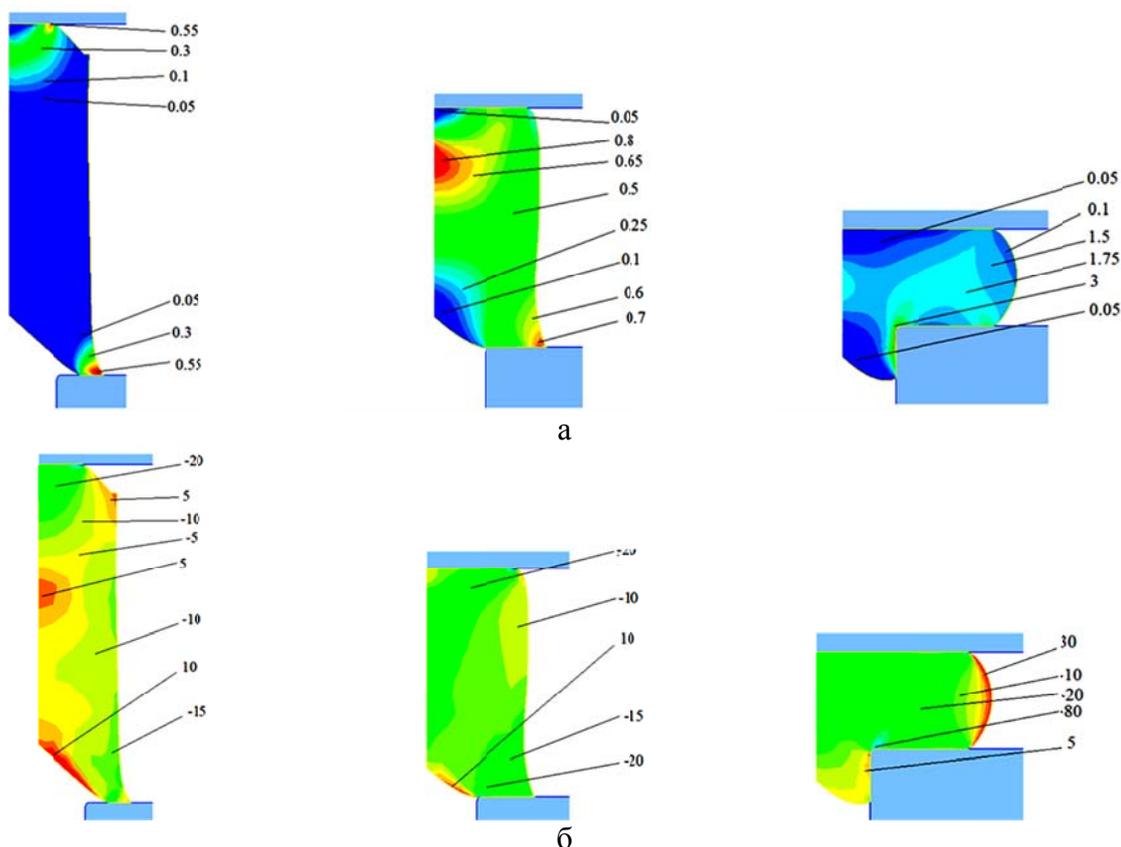


Рис. 9. Поля распределения логарифмических деформаций (а) и среднего напряжения, МПа (б) при осадке слитка массой 104 т без прибыльной части на плите с отверстием равным 0,6 от среднего диаметра тела слитка

На основе анализа данных по осадке различных слитков построена графическая зависимость относительной степени деформации осадки, при которой вершина усадочной раковины окажется в отверстии кольца, от относительного диаметра отверстия кольца (рис. 10).

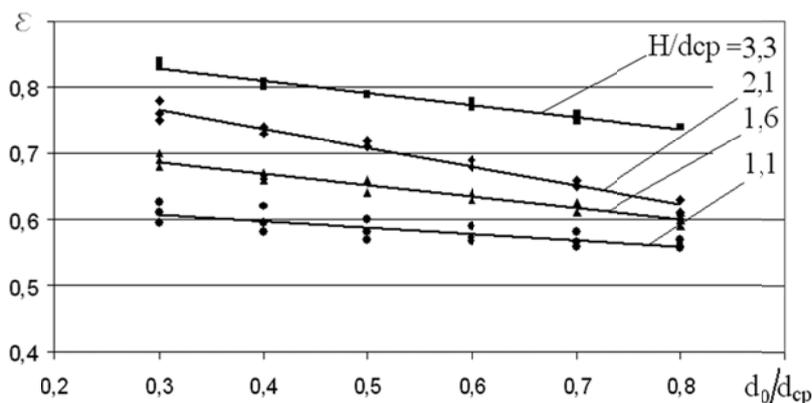


Рис. 10. График зависимости относительной степени деформации в момент выхода вершины усадочной раковины в отверстие кольца при осадке от относительного диаметра отверстия кольца

ВЫВОДЫ

Использование бесприбыльных слитков является весьма перспективным при изготовлении крупных поковок, о чем свидетельствуют результаты многочисленного внедрения на различных отечественных и зарубежных предприятиях.

Основным недостатком бесприбыльных слитков являются усадочные дефекты и металл под усадочной раковиной, обладающий большой неравномерностью химического состава.

У бесприбыльных слитков различных размеров относительная глубина усадочной раковины отличается. Так установлено, что из номенклатуры слитков ПАО «НКМЗ» без прибыльной части с увеличением соотношения высоты тела слитка к его среднему диаметру относительная глубина усадочной раковины будет уменьшаться. Показано, что в укороченных слитках без прибыльной части с соотношением высоты к диаметру 1,5 относительная глубина усадочной раковины достигает 30–35 % от высоты тела слитка, а в слитках с соотношением высоты к диаметру 2,5–3 достигает 20 %.

Проведено моделирование процесса осадки слитков без прибыльной части с усадочной раковинной из номенклатуры ПАО «НКМЗ» и «Ижорский завод». По результатам моделирования получены поля распределения логарифмических деформаций и среднего напряжения. Установлено, что по ходу осадки наименее проработанной зоной слитка является часть металла под усадочной раковинной, там сосредоточены самые малые деформации. Кроме того, металл под усадочной раковинной наименее качественный, что обуславливает необходимость его удаления. Часть некачественного металла из усадочной раковинной в процессе осадки оказывается на торце осажённой заготовки, что должно быть учтено при составлении чертежа поковки и на торец поковки, который будет соответствовать торцу осажённой заготовки, с прибыльной стороны должен быть назначен повышенный припуск.

Установлено влияние диаметра отверстия плиты и отношения высоты тела слитка к его среднему диаметру на величину относительной степени деформации осадки, при которой вершина усадочной раковинной будет вытеснена в отверстие. Данные соотношения получены в графическом виде.

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. *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 раковинны 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. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка* / [под ред. Е. И. Семенова и др.]. – М. : *Машиностроение*, 1985. – 568 с.
9. Тумко А. Н. *Моделированиековки на молоте части слитка с усадочной раковинной* / А. Н. Тумко // *Металлургическая и горная промышленность*. – 2011. – № 7. – С. 161–165.
10. *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. кафедрой ОМД ДГМА;

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

Таган Л. В. – аспирант ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: omd@dgma.donetsk.ua

Статья поступила в редакцию 29.12.2011 г.