

Сравнительный анализ процесса деформирования заготовок в выпукло-вогнутых и трапецевидных бойках

¹ВОЛОКИТИН Андрей Валерьевич, PhD, старший преподаватель, dyusha.vav@mail.ru,

²НАЙЗАБЕКОВ Абдрахман Батырбекович, д.т.н., профессор, naizabekov57@mail.ru,

^{1*}ПАНИН Евгений Александрович, PhD, доцент, cooper802@mail.ru,

³ТОЛКУШКИН Андрей Олегович, аспирант, a.o.tolkushkin@urfu.ru,

²ЛЕЖНЕВ Сергей Николаевич, к.т.н., доцент, sergey_legnev@mail.ru,

¹НАО «Карагандинский индустриальный университет», Казахстан, Темиртау, пр. Республики, 30,

²Рудненский индустриальный институт, Казахстан, 111500, Рудный, ул. 50 лет Октября, 38,

³Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Представлены результаты сравнительного анализа процесса деформирования заготовок в выпукло-вогнутых и трапецевидных бойках, проведенного с помощью компьютерного моделирования методом конечных элементов в программе Deform. В обеих конструкциях рассмотрены два варианта – с равным и неравным отношением выступа к впадине. Для сравнительного анализа рассмотрены эквивалентные напряжения и деформации, энергосиловые параметры. Также на основе компьютерного моделирования был проведен анализ эволюции микроструктуры при деформировании заготовок в выпукло-вогнутых и трапецевидных бойках. В ходе компьютерного моделирования было доказано некоторое преимущество конструкции выпукло-вогнутых бойков по сравнению с трапецевидными бойками.

Ключевые слова: ковка, бойки, моделирование, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, размер зерна.

Введение

Уже давно доказано, что качественная проработка литой структуры металла при небольших изменениях исходных размеров заготовки (т.е. при небольшом укове), в первую очередь основано на реализации в процессековки дополнительных знакопеременных или сдвиговых деформаций во всем объеме деформируемого металла [1-2]. Технически добиться реализации в процессековки дополнительных знакопеременных или сдвиговых деформаций во всем объеме деформируемого металла можно несколькими способами, к которым можно отнести: осадка с кручением [3], деформирование с несимметричным приложением нагрузки [4], протяжка заготовки в инструментах со сложным движением бойков [5-6].

Одним из таких способов является технологияковки поковок прямоугольного поперечного сечения и пластин в трапецевидных бойках с отношением трапецевидного выступа к впадине равным $m/n=1$ и $m/n<1$, где m – длина трапецевидного выступа, n – длина трапецевидной впадины (рисунок 1, а-б) [2]. Данная технология

очень хорошо себя зарекомендовала на практике. Так, данный способ деформирования при циклическом деформировании позволяет получать заготовки прямоугольного сечения с мелкозернистой структурой и повышенным уровнем механических свойств при незначительных энергозатратах [2]. Но, к сожалению, эта технология всё-таки имела один небольшой недостаток – это появление опасных концентраторов напряжений в точках 1 и 2, которые при неправильном выборе технологических и геометрических параметровковки (человеческий фактор) могли привести не к повышению качества металла за счет реализации значительных сдвиговых деформаций, а к браку в результате разрушения металла. Для устранения данного недостатка, и в частности устранения в какой-то степени человеческого фактора, была усовершенствована данная технология, и дляковки поковок прямоугольного поперечного сечения и пластин были предложены не трапецевидные бойки, а выпукло-вогнутые бойки, которые позволят избежать появления опасных концентраторов напряжений.

В частности, были разработаны выпукло-вогнутые бойки (рисунок 1, в-г) [7-8], так же с отношением выступа к впадине равным $m/n=1$ и $m/n<1$, назначением которых было повышение качества металла заготовки за счет локализации сдвиговых деформаций во всем объеме деформируемого тела и избежание появления микро- и макротрещин в металле. Технический результат при использовании предлагаемой конструкции бойков дляковки поковок и заготовок типа плит и пластин достигается тем, что инструмент для протяжки заготовок прямоугольного поперечного сечения имеет верхний боек со сферическим выступом, а нижний боек со сферической впадиной.

Данная работа посвящена сравнительному анализу процесса деформирования заготовок в трапециевидных и выпукло-вогнутых бойках, который бы дополнительно к доказательствам преимущества выпукло-вогнутых бойков по сравнению с трапециевидными бойками, приведенным в работах [7-8], позволил показать, что использование выпукло-вогнутых бойков позволяет создать более благоприятное напряженно-деформированное состояние для получения в деформируемом металле равномерной мелкозернистой структуры без опасности его разрушения и при меньших усилиях деформирования. Для достижения поставленной задачи было проведено компьютерное моделирование процесса деформирования заготовок в трапециевидных и выпукло-вогнутых бойках в специализированном программном комплексе DEFORM.

Методика исследования

При моделировании приняты следующие допущения:

- тип материала заготовки был задан как упругопластичный, что позволяет более корректно имитировать течение металла в реальных условиях; тип материал бойков был представлен как жесткое тело;
- в качестве материала заготовки была выбрана сталь AISI1045, соответствующая стали 45;
- процесс деформирования заготовки был установлен как неизотермический, т.е. помимо отдачи тепла инструменту заготовка также остывала на воздухе в свободных от контакта зонах;

начальная температура нагрева заготовки была равна 1100°C , коэффициент теплопередачи от заготовки к инструменту был принят равным $5000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{град})$, что соответствует рекомендуемым данным Deform для деформационных моделей;

- размеры заготовки – $30\times 200 \text{ мм}$, на заготовке была создана сетка из 5000 конечных элементов с равным отношением сторон (длина грани элемента была равна $0,77 \text{ мм}$);

- коэффициент трения на контакте заготовки с бойками был установлен равным $0,3$, как среднее значение для шлифованной поверхности;

- скорость движения верхнего бойка равна 1 мм/с .

- при моделировании было установлено условие, что расчет прекращается при достижении между плоскими участками бойков расстояния, равного толщине заготовки 30 мм ;

- исходный размер зерна стали AISI1045 был принят равным 80 мкм .

В качестве рассматриваемых параметров были выбраны:

- компоненты напряженно-деформированного состояния: эквивалентные напряжения и деформации, которые включают в себя компоненты деформации и напряжения в следующем виде:

$$\epsilon_{\text{экв}} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2}, \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}, \quad (2)$$

где $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ – главные деформации,

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения.

- усилие деформирования;

- размер зерна.

Результаты и обсуждение

Было выявлено, что в процессе деформирования накопление эквивалентной деформации возникает в основном на боковых участках рабочих поверхностей. В бойках с длиной выступа, равной длине впадины ($m=n$), уровень деформации составляет $0,786$ в выпукло-вогнутых бойках и $0,979$ в трапециевидных бойках (рисунок 2). При этом ширины очагов деформации достаточно отличаются – в выпукло-вогнутых бойках данные

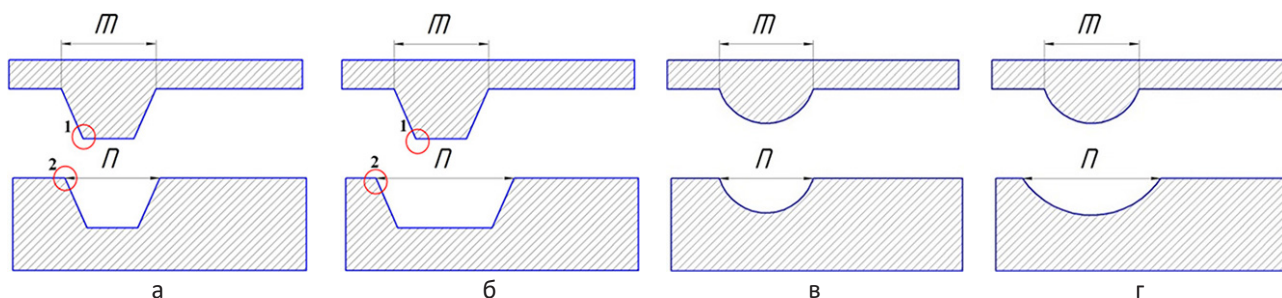


Рисунок 1 – Трапециевидные и выпукло-вогнутые бойки с различным отношением выступа к впадине

очаги являются более широкими, что является следствием наличия в каждом очаге лишь одного угла на нижнем бойке. В трапециевидных бойках в каждом очаге присутствуют по два угла, что существенно уменьшает интенсивность течения металла.

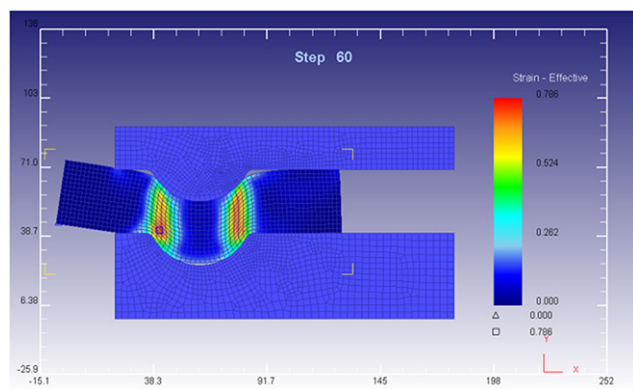
В бойках, в которых длина выступа меньше длины впадины ($m < n$), уровень деформации составляет 0,282 в выпукло-вогнутых бойках и 0,449 в трапециевидных бойках (рисунок 3). При этом ширины очагов деформации становятся значительно больше, чем в бойках с равным отношением выступа и впадины – в данных бойках в обоих вариантах очаги деформации охватывают почти весь объем металла, находящийся между выступом и впадиной.

Таким образом, анализ деформированного состояния показал, что деформирование заготовки в выпукло-вогнутых бойках протекает с меньшими значениями эквивалентной деформации при одинаковом уровне обжатия по сравнению с трапециевидными бойками. Так, в конфигурации бойков $m = n$ разница значений составляет примерно 20%, а в случае $m < n$ разница значений

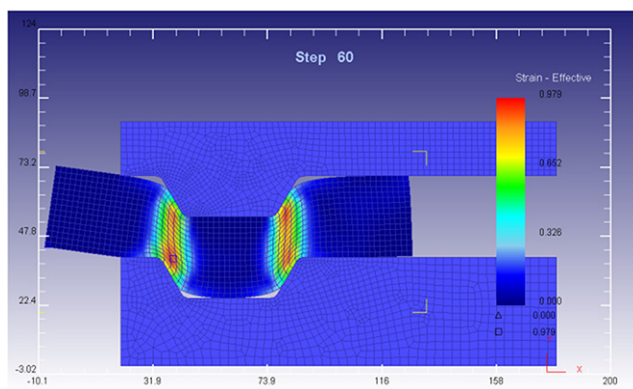
возрастает примерно до 37%. При этом для каждого типа бойков уровень деформации при варианте $m = n$ превышает более чем в 2 раза уровень деформации при $m < n$. Данный фактор объясняется тем, что в обоих вариантах бойков типа $m = n$ на наклонных участках помимо деформации сдвига реализуется определенный уровень обжатия заготовки по толщине, что при дальнейшем выпрямлении заготовки на плоском участке не позволит получить правильную форму сечения. Поэтому наиболее оптимальной конструкцией являются бойки типа $m < n$, т.к., несмотря на то, что значение деформации меньше, чем в аналогичных бойках с $m = n$, в данном случае заготовка прорабатывается практически на всем деформируемом участке, а также не подвергается дополнительному обжатию по толщине.

Исследование поведения металла при его деформировании сводится к соблюдению неравенства, отражающего условие прочности, согласно которому максимальное напряжение не должно превышать уровень допускаемого напряжения:

$$\sigma_{\text{экв}} \leq [\sigma], \quad (3)$$

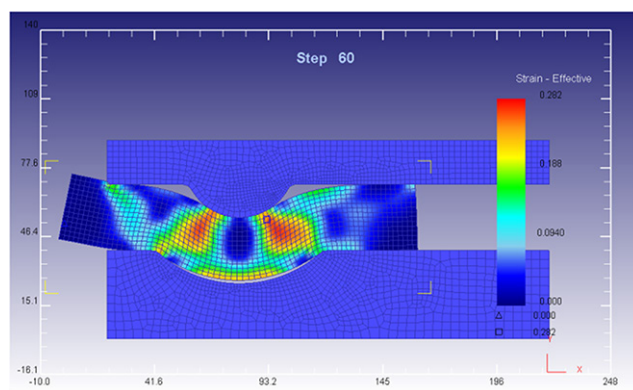


а

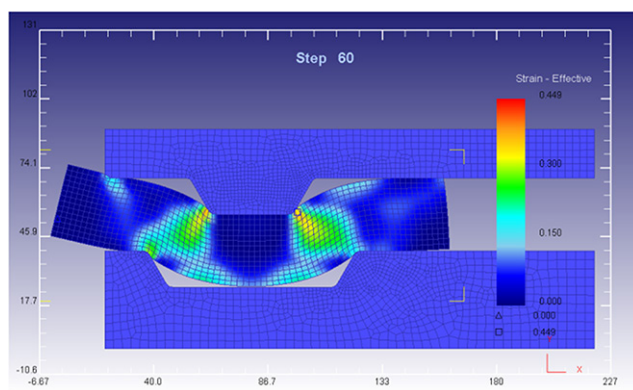


б

а) выпукло-вогнутые бойки; б) трапециевидные бойки

Рисунок 2 – Эквивалентная деформация в бойках с $m = n$ 

а



б

а) выпукло-вогнутые бойки; б) трапециевидные бойки

Рисунок 3 – Эквивалентная деформация в бойках с $m < n$

где $\sigma_{\text{экв}}$ – эквивалентное напряжение;
 $[\sigma]$ – допускаемое напряжение.

В бойках с длиной выступа равной длине впадины ($m=n$) уровень эквивалентных напряжений составляет 311 МПа в выпукло-вогнутых бойках и 310 МПа в трапецевидных бойках (рисунок 4). На конечном этапе деформирования значение эквивалентных напряжений в выпукло-вогнутых бойках становится примерно таким же, как и в трапецевидных бойках.

Однако из рисунка 4 можно заметить, что концентрация максимальных напряжений в обоих вариантах бойков отличается – в выпукло-вогнутых бойках максимальные напряжения сосредоточены на верхней поверхности заготовки, а в трапецевидных бойках максимальные напряжения сосредоточены на всех наклонных гранях заготовки.

В бойках, в которых длина выступа меньше длины впадины ($m < n$) уровень эквивалентных напряжений существенно ниже и составляет 242 МПа в выпукло-вогнутых бойках и 272 МПа в трапецевидных бойках (рисунок 5). Снижение уровня напряжений в данных бойках является

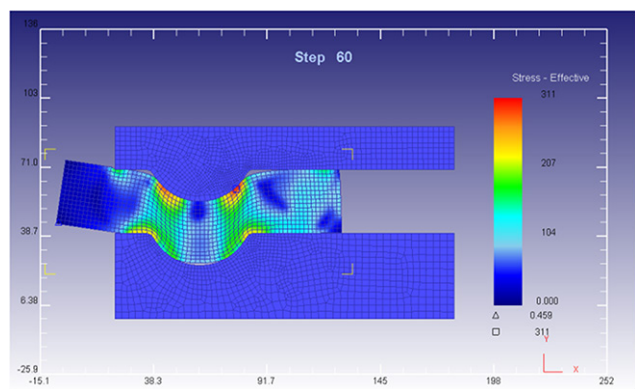
следствием отсутствия дополнительного обжатия по толщине на наклонных участках, что позволяет практически полностью исключить возникновение концентраторов напряжений.

Анализируя распределение эквивалентного напряжения в разных конструкциях выпукло-вогнутых и трапецевидных бойков, можно сделать следующие выводы:

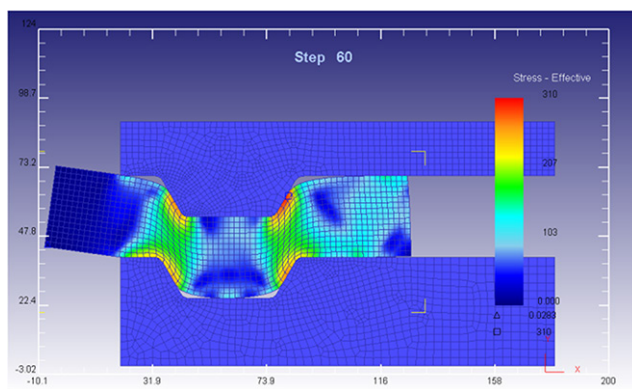
1) наиболее высокие значения эквивалентного напряжения образуются при деформировании в трапецевидных бойках обоих вариантов;

2) предельно допустимым значением предела прочности для деформируемой стали 45 является $[\sigma_v] = 610$ МПа. Наиболее близким к данному значению на протяжении всего деформирования были значения при деформировании в трапецевидных бойках. Вследствие этого, можно сказать, что металл, деформируемый в трапецевидных бойках, сильнее подвержен разрушению, чем в выпукло-вогнутых бойках.

Важнейшей характеристикой исследования при деформировании заготовок в различных инструментах является изучение энергосиловых параметров. Очень важно, чтобы при качествен-



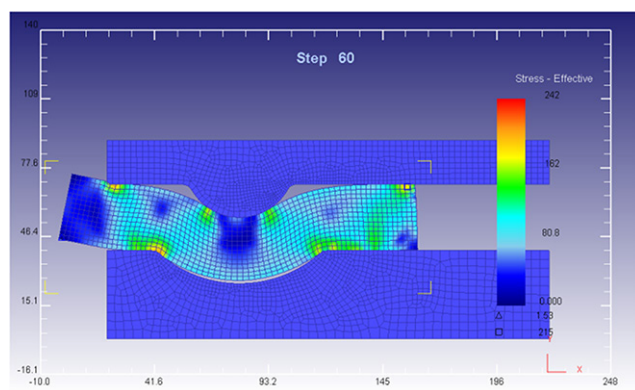
а



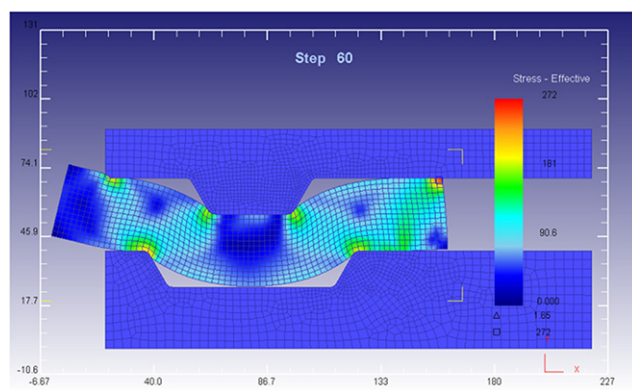
б

а) выпукло-вогнутые бойки; б) трапецевидные бойки

Рисунок 4 – Эквивалентное напряжение в бойках с $m = n$



а



б

а) выпукло-вогнутые бойки; б) трапецевидные бойки

Рисунок 5 – Эквивалентное напряжение в бойках с $m < n$

ной проработке заготовки усилие, развиваемое в инструменте, имело минимальное значение. Полученные в ходе компьютерного моделирования значения развиваемого усилия в трапециевидных и выпукло-вогнутых бойках показывают усилие, развиваемое выпукло-вогнутыми бойками любой конструкции ($m=n$, $m<n$), на протяжении всего цикла деформирования меньше, чем при деформировании в трапециевидных бойках.

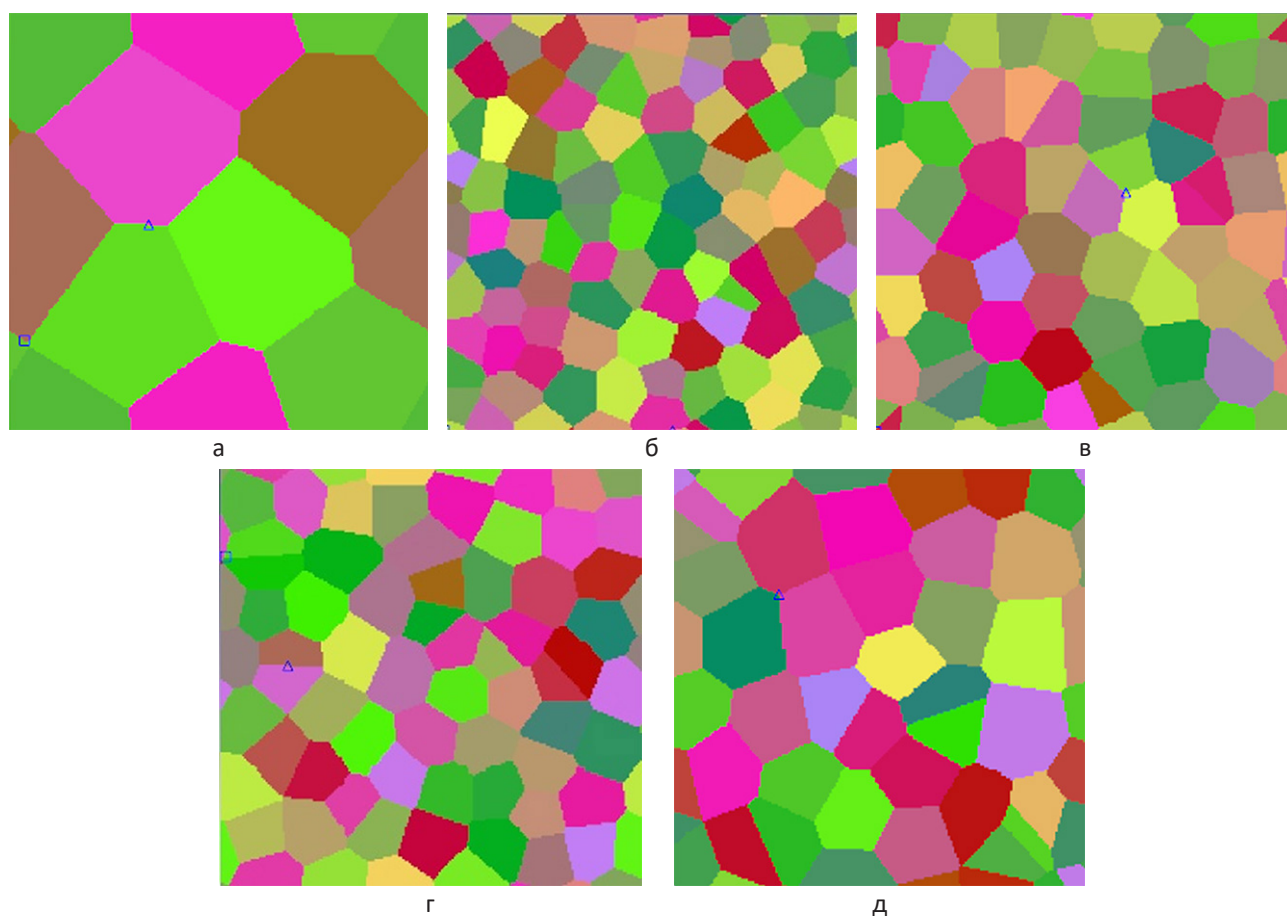
Для расчета эволюции микроструктуры был использован механизм Cellular Automata 2.0, представленный в 13-й версии Deform. В нем был усовершенствован механизм расчета формы зерен при деформировании. Суть расчета эволюции микроструктуры данным методом сводится к использованию уже рассчитанной модели. В выбранных точках устанавливаются окна расчета с определенным разрешением, в которых наблюдается изменение как размера зерен, так и их формы. С учетом того, что начальный размер зерна был задан равным 80 мкм, было выбрано квадратное окно с размером грани 200 мкм.

Анализ результатов компьютерного моделирования эволюции микроструктуры стали AISI1045 показал, что как в трапециевидных, так

и в выпукло-вогнутых бойках наблюдается существенное уменьшение размеров исходного зерна с увеличением циклов деформирования заготовок. Но при сравнении изменений микроструктуры металла, деформированного в трапециевидных и выпукло-вогнутых бойках, очевидно преимущество трапециевидных бойков, поскольку при их использовании структура металла эволюционирует более интенсивно (рисунок 6). Так, при использовании трапециевидных бойков с $m=n$ средний размер зерна после 3-х циклов деформирования составил 22 мкм, трапециевидных бойков с $m<n$ размер средний зерна равен 28 мкм, в выпукло-вогнутых бойках с $m=n$ средний размер зерна равен 25, а с $m<n$ равен 33 мкм.

Выводы

Анализируя полученные результаты компьютерного моделирования, можно сделать следующий вывод: при выборе кузнечного инструмента, т.е. трапециевидных или же выпукло-вогнутых бойков для отковки поковок типа плит и пластин, имеющих мелкозернистую структуру, необходимо учесть тот факт, что при использовании выпукло-вогнутых бойков, несмотря на более низкий



а – исходная структура; б – после трех циклов ковки в трапециевидных бойках с $m = n$; в – после трех циклов ковки в трапециевидных бойках с $m < n$; г – после трех циклов ковки в выпукло-вогнутых бойках с $m = n$; д – после трех циклов ковки в выпукло-вогнутых бойках с $m < n$

Рисунок 6 – Эволюция микроструктуры

уровень проработки металла, реализуется более благоприятное напряженно-деформированное состояние и отсутствуют концентраторы опасных напряжений, которые возникают при деформировании заготовок в трапециевидных бойках. Кроме этого, дополнительным преимуществом

ступенчато-клиновидных бойков является более широкая зона распределения деформации, меньшее изменение исходных размеров заготовки, а также меньшее значение развиваемого усилия деформирования.

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (Грант № AP09057965).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Охрименко Я.М., Тюрин В.А. Неравномерность деформации при ковке. М.: Машиностроение, 1979. 182 с.
2. Найзабеков А.Б. Научные и технологические основы повышения эффективности процессовковки при знакопеременных деформациях. Алматы, 2000. 336 с.
3. Бурлаков И.А., Забелян Д.М., Петров П.А., Степанов Б.А., Бач Ву Чонг. Применение метода активного эксперимента для определения структуры и пластичности в зависимости от технологических режимов осадки с кручением // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. №5. С. 228-234.
4. Алиев И.С., Жбанков Я.Г., Таган Л.В. Моделирование кузнечной протяжки в комбинированных бойках несимметричной формы // Вестник НТУУ «КПИ». Серия машиностроение. 2013. № 3. С. 77-83.
5. Сегал В.М., Резников В.И., Павлик Д.А. Технологические особенностиковки-протяжки с продольным сдвигом бойков // Кузнечно-штамповочное производство. 1980. № 11. С. 8-10.
6. Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Panin E.A. Research of the deformation process of blanks in the dies with elastic elements. Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 2017. Vol. 52. Pp. 205-212.
7. Инновационный патент РК № 20502. Инструмент для протяжки заготовок прямоугольного поперечного сечения / Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н., 2008. Бюл. 12.
8. Инновационный патент РК №22497. Инструмент дляковки заготовок прямоугольного поперечного сечения / Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н., 2010. Бюл. 5.
9. Gourdet S., Montheillet F. A model of continuous dynamic recrystallization. Acta Materialia. 2003, Vol. 51, pp. 2685-2699.
10. Goetz R.L., Seetharaman V. Modeling Dynamic Recrystallization Using Cellular Automata. Scripta Materialia. 1998, Vol. 38, pp. 405-413.

Дөңес-ойыс және трапеция тәрізді соққылардағы дайындамаларды деформациялау процесін салыстырмалы талдау

¹**ВОЛОКИТИН Андрей Валерьевич**, PhD, аға оқытушы, dyusha.vav@mail.ru,

²**НАЙЗАБЕКОВ Абдрахман Батырбекович**, т.ғ.д., профессор, naizabekov57@mail.ru,

^{1*}**ПАНИН Евгений Александрович**, PhD, доцент, cooper802@mail.ru,

³**ТОЛКУШКИН Андрей Олегович**, аспирант, a.o.tolkushkin@urfu.ru,

²**ЛЕЖНЕВ Сергей Николаевич**, т.ғ.к., доцент, sergey_legnev@mail.ru,

¹«Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Теміртау, Республика даңғылы, 30,

²Рудный индустриалды институты, Қазақстан, 111500, Рудный, Қазанға 50 жыл көшесі, 38,

³Ресей Федерациясының бірінші президенті Б.Н. Ельцин атындағы Орал федералды университеті, Ресей, Екатеринбург, Мира көшесі, 19,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Deform бағдарламасындағы соңғы элементтерді компьютерлік модельдеу арқылы жүргізілген дөңес-ойыс және трапеция тәрізді соққылардағы дайындамаларды деформациялау процесін салыстырмалы талдау нәтижелері келтірілген. Екі нұсқаны қарастырылады – проекцияның депрессияға қатынасы тең және тең емес. Салыстырмалы талдау үшін эквивалентті кернеулер мен деформациялар, қуат параметрлері қарастырылады. Сондай-ақ, компьютерлік модельдеу негізінде дөңес-ойыс және трапеция тәрізді соққылардағы дайындамалардың деформациясы кезінде микроқұрылымның эволюциясы талданды. Компьютерлік модельдеу кезінде трапеция тәрізді соққылармен салыстырғанда дөңес-ойыс соққыларды жобалаудың кейбір артықшылығы дәлелденді.

Кілт сөздер: соғу, шайқау, модельдеу, ақырлы элементтер әдісі, кернеулі-деформацияланған күй, астық мөлшері.

Comparative Analysis of the Deformation Process of Workpieces in Convex-concave and Trapezoidal Strikers¹**VOLOKITIN Andrey**, PhD, Senior Lecturer, dyusha.vav@mail.ru,²**NAYZABEKOV Abdrakhman**, Dr. of Tech. Sci., Professor, naizabekov57@mail.ru,^{1*}**PANIN Evgeniy**, PhD, Associate Professor, cooper802@mail.ru,³**TOLKUSHKIN Andrey**, Graduate Student, a.o.tolkushkin@urfu.ru,²**LEZHNEV Sergey**, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, sergey_legnev@mail.ru,¹NCJSC «Karaganda Industrial University», Kazakhstan, Temirtau, Republic Avenue, 30,²Rudny Industrial Institute, Kazakhstan, 111500, Rudny, 50 years of October Street, 38,³Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Russia, Yekaterinburg, Mira Street, 19,

*corresponding author.

Abstract. The results of a comparative analysis of the deformation process of workpieces in convex-concave and trapezoidal strikers, carried out using computer modeling by the finite element method in the Deform program, are presented. In both designs, two variants are considered – with an equal and unequal ratio of the protrusion to the depression. For comparative analysis, equivalent stresses and deformations, energy-power parameters are considered. Also, on the basis of computer modeling, the analysis of the evolution of the microstructure during the deformation of workpieces in convex-concave and trapezoidal strikers was carried out. In the course of computer modeling, some advantage of the design of convex-concave strikers in comparison with trapezoidal strikers was proved.

Keywords: forging, strikers, modeling, finite element method, stress-strain state, grain size.

REFERENCES

1. Ohrimenko Ya.M. Tekhnologiya kuznechno-shtampovochного производства. Uchebnik [Forging and stamping production technology]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1976. 560 p.
2. Najzabekov A.B. Usloviya razvitiya sdvigovykh deformatsiy pri kovke [Conditions for the development of shear deformations during forging]. Almaty: Gylm, 1997. 282 p.
3. Burlakov I.A., Zabel'yan D.M., Petrov P.A., Stepanov B.A., Bach Vu Chong. Primeneniye metoda aktivnogo eksperimenta dlya opredeleniya struktury i plastichnosti v zavisimosti ot tekhnologicheskikh rezhimov osadki s krucheniem [Application of the method of active experiment to determine the structure and plasticity depending on the technological modes of torsion precipitation] // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki [News of TulSU. Technical sciences]. 2019. No. 5. Pp. 228-234.
4. Aliev I.S., Zhabankov Ya.G., Tagan L.V. Modelirovaniye kuznechnoy protyazhki v kombinirovannykh boykakh nesimmetrichnoy formy [Modeling of forging broaching in combined strikers of asymmetrical shape] // Vestnik NTUU «KPI». Seriya mashinostroyeniye [Bulletin of NTUU «KPI». Mechanical Engineering series]. 2013. No. 3. Pp. 77-83.
5. Segal V.M., Reznikov V.I., Pavlik D.A. Tekhnologicheskie osobennosti kovki-protyazhki s prodol'nym sdvigom boykov [Technological features of forging-broaching with longitudinal shift of strikers] // Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo [Forging and stamping production]. 1980. No. 11. Pp. 8-10.
6. Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Panin E.A. Research of the deformation process of blanks in the dies with elastic elements. Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 2017. Vol. 52. Pp. 205-212.
7. Innovatsionnyy patent RK No. 20502. Instrument dlja protyazhki zagotovok prjamougol'nogo poperechnogo secheniya [A tool for broaching blanks of rectangular cross-section] / Najzabekov A.B., Lezhnev S.N., 2008. Bul. 12.
8. Innovatsionnyy patent RK No. 22497. Instrument dlja kovki zagotovok prjamougol'nogo poperechnogo secheniya [A tool for broaching blanks of rectangular cross-section] / Najzabekov A.B., Lezhnev S.N., 2010. Bul. 5.
9. Gourdet S., Montheillet F. A model of continuous dynamic recrystallization. Acta Materialia. 2003, Vol. 51, pp. 2685-2699.
10. Goetz R.L., Seetharaman V. Modeling Dynamic Recrystallization Using Cellular Automata. Scripta Materialia. 1998, Vol. 38, pp. 405-413.