

## РАЗДЕЛ I МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.73.01

Гринкевич В. А.  
Чухлеб В. Л.  
Сальников А. С.  
Тумко А. Н.  
Ашкелянец А. В.  
Банашек Г.

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ ОСАДКИ НА ПРЕССЕ ЗАГОТОВКИ СПЛАВА ЭИ698-ВД ПУТЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Операция осадки является одной из основных при выполнении технологии свободной ковки. Она же является и наиболее энергоемкой среди этих операций. Значительные энергетические затраты связаны с тем, что площадь контактной поверхности охватывает всю торцевую поверхность заготовки. При этом в связи со значительной ее распространенностью ее же и максимально исследовали с разных сторон. Но в последнее время все большее распространение получают специальные стали и сплавы, которые имеют в своем составе большое количество легирующих элементов. При этом все известные зависимости формоизменения углеродистых сталей не могут достоверно описывать деформацию специальных сталей и сплавов из-за значительных отличий процессов деформационного упрочнения и разупрочнения при горячей осадке, которые, в конечном итоге, значительно влияют на качество получаемой продукции.

Несмотря на значительный пласт исследовательских работ [1–3] по изучению формоизменения металла при выполнении осадки, можно отметить, что большинство из них носят экспериментальный характер. Это является, безусловно, значительным достоинством этих работ, но и одновременно ограничивает круг их притязаний по изучению взаимосвязи параметров напряженно-деформированного состояния и показателей качества поковок. С чем это связано? В первую очередь с тем, что получение показателей напряженно-деформированного состояния экспериментальным путем имеют свои особенности, которые в большинстве случаев ограничены сложностью получением этих показателей. Экспериментальные исследования, при всей их уникальности, не позволяют получать поля напряжений и деформаций в явном виде, что позволяют именно методы математического моделирования. И особенно это относится к исследованию марок сталей и сплавов специального назначения. Одной из таких марок является жаропрочный сплав на основе никеля ЭИ698-ВД (ХН73МБТЮ-ВД). В его состав, кроме никеля, входят следующие элементы: С 0,03–0,07 %; Si до 0,5 %; Mn до 0,4 %; Cr 13–16 %; W до 0,2 %; V до 0,2 %; Mo 2,8–3,2 %; Cu до 0,07 %; Ti 2,35–2,75 %; Al 1,45–1,8 %; Nb 1,9–2,2 %; Со до 0,5 %; В 0,006–0,008 %; Fe до 2,0 %; Pb до 0,001 %.

Целью работы является рассмотрение формоизменения при осадке заготовки из жаропрочного сплава ЭИ698-ВД и исследование влияния междеформационной паузы на распределение показателей напряженно-деформированного состояния и температуры.

При деформации таких материалов основными кузнечными операциями являются все те же осадка и протяжка. При этом осадка может выполняться по различным технологическим режимам. Суть этих различий состоит в том, что вся деформация при осадке может быть получена сразу за весь процесс или несколько разнесенной во времени, т. е. при использовании технологических пауз во время процесса. Немаловажным фактором,

определяющим качество конечной продукции является температура деформации. И самым главным параметром, определяющим качество продукции (поковки), является распределение деформации по сечению заготовки и готовой поковки.

Процесс осадки по своей сути сам способствует неравномерности распределения деформации по сечению заготовки. Если рассмотреть факторы определяющие неравномерность деформации, то именно наличие трения на контакте в основном определяет различие формоизменения приконтактных и внутренних слоев металла при деформации. Это неизбежный процесс, который обуславливает тот факт, что на контакте металла с инструментом точки (в связи с наличием сопротивления их перемещению в виде трения) имеют значительно меньшую деформацию, чем максимально удаленные от него. Эти положения являются устоявшимися в теории процессовковки [4]. Однако, что происходит с распределением деформации при наличии междеформационных пауз? Этот вопрос являлся одной из тем исследований Л. Н. Соколова [5]. Его исследования в основном касались междеформационных пауз углеродистых сталей и их влияния на энергосиловые показатели процесса, таких как сила осадки. В результате Л. Н. Соколовым было выявлено, что именно наличие междеформационных пауз позволяет снизить величину силы осадки за счет интенсификации протекания процесса рекристаллизации в продеформированном металле. Теперь вопрос ставится о том, а что же за показатели напряженно-деформированного состояния мы получаем в процессе осадки с наличием междеформационных пауз. Этот вопрос особенно актуален для деформации аустенитных жаропрочных сплавов, у которых динамическое и статическое разупрочнение в процессе деформации протекает значительно медленнее, чем в углеродистых и легированных сталях. Если для высоколегированных сталей перлитного класса типа 18X2H4BA, 30XГСН2МА, 38X2МЮА допустимая степень деформации за один ход машины (пресса) не более 80 %, то для сплава ЭИ698-ВД – не более 40 %. Превышение допустимых единичных обжатий приводит к существенным микроразрушениям металла и ухудшению его механических и других служебных свойств. Вследствие того, что при осадке деформация протекает не равномерно по всему объёму заготовки, также имеется значительная неравномерность температуры, которая определяется в том числе и скоростями, и степенями деформации в каждой точке осаживаемого металла, необходимо оценить влияния показателей напряженно-деформированного состояния на показатели качества жаропрочного сплава ЭИ698-ВД.

Для достижения поставленной цели исследования было выполнено математическое моделирование процесса осадки заготовки из сплава ЭИ698-ВД при использовании комплекса программ «FORGE 3D». При этом процесс осадки моделировался как с наличием междеформационной паузы, так и с ее отсутствием. Данная марка сплава используется в условиях ПАО «Днепроспецсталь» при производстве поволоков ответственного назначения. При этом на основании производственного опыта ПАО «Днепроспецсталь» были сформулированы основные требования к начальным и граничным условиям моделирования процесса:

1. Исходной заготовкой является цилиндр с начальными размерами –  $\varnothing 240$  мм,  $H_3 = 350$  мм.
2. Начальная температура заготовки 1140 °С.
3. Начальная температура инструмента – 20 °С; 420 °С; 820 °С.
4. Время паузы –  $t_{\text{паузы}}$  – 0 с; 5 с; 10 с.
5. Величина относительной условной деформации за весь процесс 70 %.
6. Величина относительной деформации до междеформационной паузы 35 %.
7. Скорость инструмента – 40 мм/с.
8. Марка сплава ЭИ698-ВД.

При моделировании в начальный момент времени заготовка считалась равномерно прогретой по всему сечению. Выбор размеров заготовки был обусловлен размерами образцов, которые брались из тела заготовки для проведения механических испытаний по указанной схеме (с наличием и отсутствием междеформационных пауз), и возможностью сопоставления механических свойств поволоков, полученных в условиях ПАО «Днепроспецсталь», с результатами математического моделирования. Для этого из продеформированной в производственных условиях заготовки из половины сечения осаженой заготовки (относительно вертикальной оси) берутся 12 проб для механических испытаний из разных точек заготовки,

которые и будут сопоставлены с результатами математического моделирования показателей напряженно-деформированного состояния. В данной статье рассмотрены только результаты математического моделирования и проведен его анализ.

Теперь рассмотрим результаты математического моделирования всего процесса осадки данной марки стали. В качестве основных показателей напряженно-деформированного состояния выбраны поля распределения деформации, напряжений и температур (рис. 1–3).

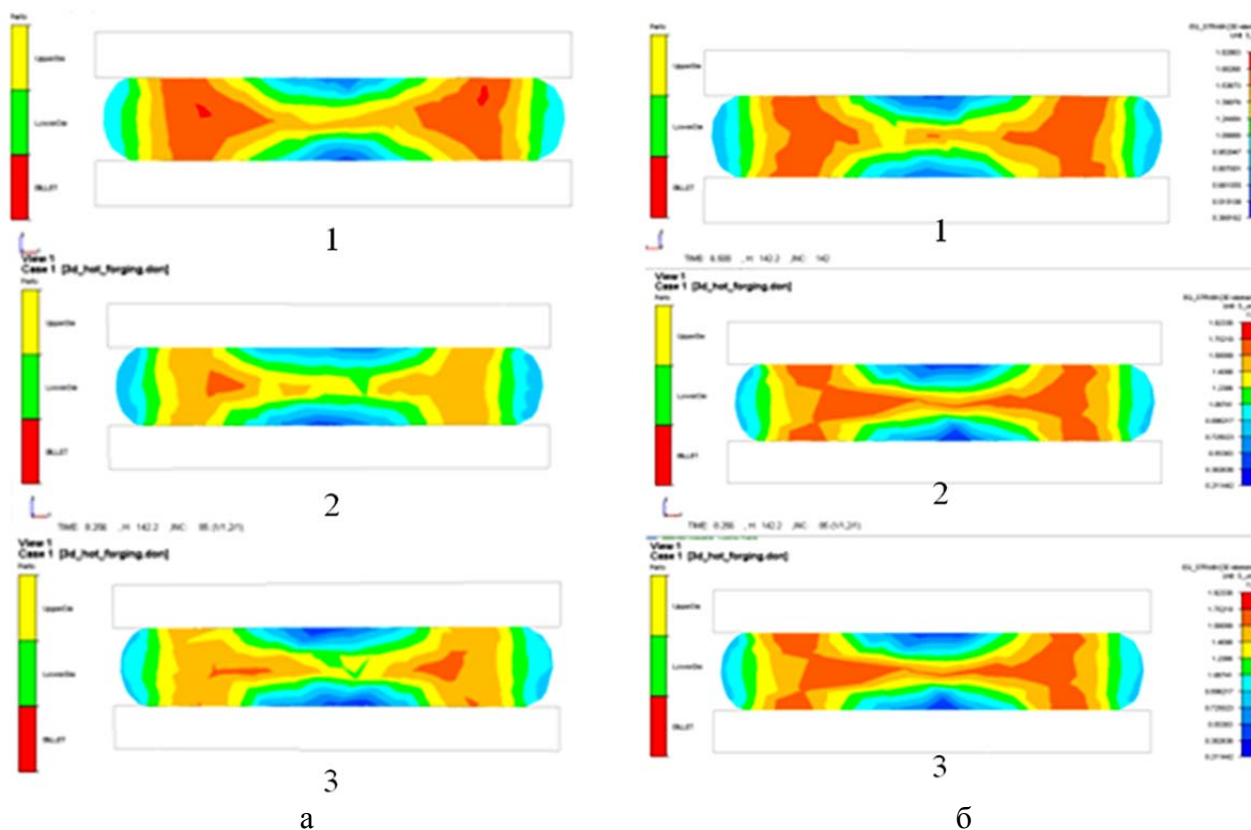


Рис. 1. Распределение деформации при осадке заготовки из сплава ЭИ698-ВД при следующих параметрах:

- а – температура инструмента 20 °С; 1 – без паузы; 2 – с паузой 5 с; 3 – с паузой 10 с;
- б – температура инструмента 420 °С; 1 – без паузы; 2 – с паузой 5 с; 3 – с паузой 10 с

По результатам расчета этих полей можно сделать следующие выводы. Влияние междеформационных пауз уже начинает сказываться на этапе распределения деформаций. Как видно из рис. 1, мы имеем более значительную разницу в величинах деформаций при сравнении осадки без паузы (рис. 1 (а–1, б–1)) и при осадке с междеформационной паузой (рис. 1 (а–2 и 3, б–2 и 3)). При этом с повышением температуры инструмента величина деформации во внутренних слоях увеличивается, но одновременно наблюдается меньшая неравномерность деформации, которая наблюдается в случае при простой осадке без междеформационной паузы. Можно сказать, что с увеличением величины паузы и повышением температуры инструмента происходит более «щадящий» режим деформации, который позволяет одновременно и максимально проработать металл во внутренних слоях и в минимальной степени (насколько возможно) снизить неравномерность деформации. Это позволит, в свою очередь, повысить качество поковок за счет именно меньшей неравномерности деформации, которая наблюдается при осадке без деформационной паузы.

Теперь перейдем к рассмотрению напряженного состояния (рис. 2). Как видно из распределения напряжений при осадке без паузы и с паузой, значительной разницы в напряженном состоянии для двух случаев практически нет. Наблюдается только незначительное увеличение величины сжимающих напряжений в центральной зоне при увеличении междеформационной паузы (рис. 2 (а–2 и 3; б–2 и 3)). При этом величина растягивающих напряжений

в кольцевой зоне практически остается неизменной. Незначительное, но все же увеличение сжимающих напряжений в центральной зоне должно положительно сказаться на качестве получаемой поковки, т. е. при этом в тех же зонах мы наблюдаем выравнивание деформационных параметров (рис. 1).

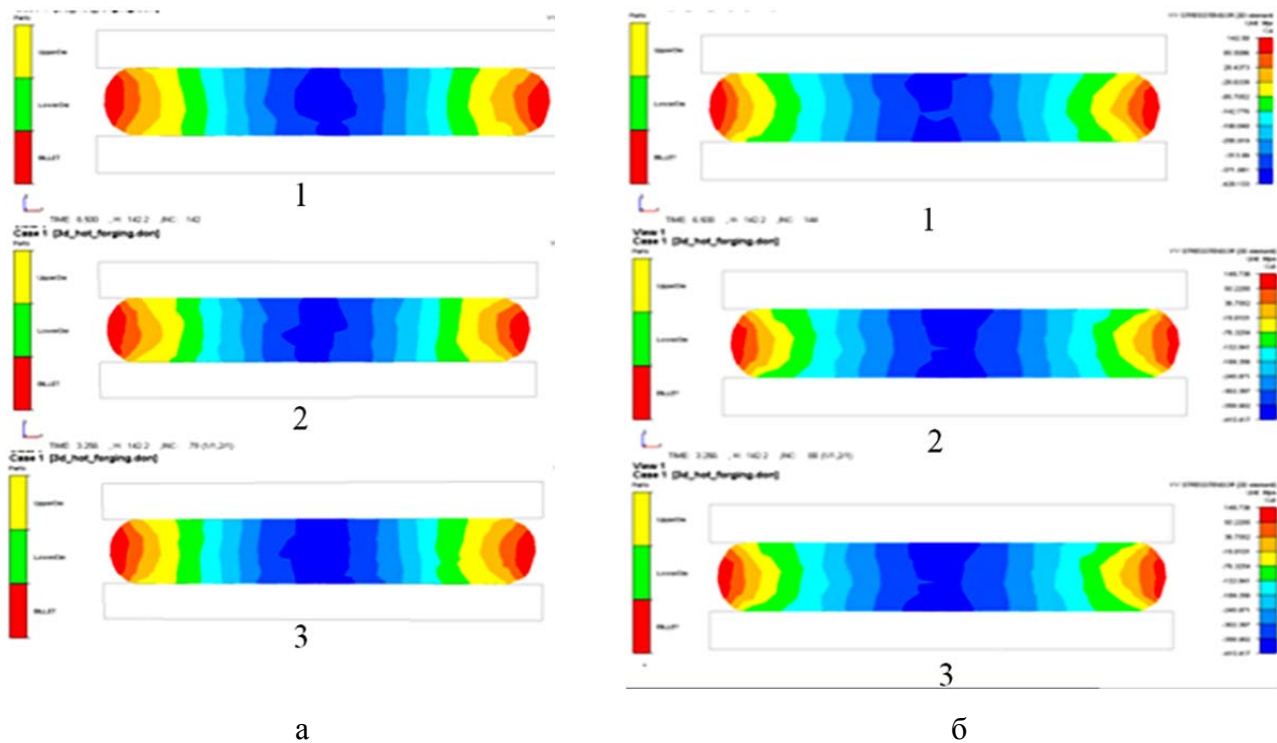


Рис. 2. Распределение напряжений при осадке заготовки из сплава ЭИ698-ВД при следующих параметрах:  
 а – температура инструмента 20 °С; 1 – без паузы; 2 – с паузой 5 с; 3 – с паузой 10 с;  
 б – температура инструмента 820 °С; 1 – без паузы; 2 – с паузой 5 с; 3 – с паузой 10 с

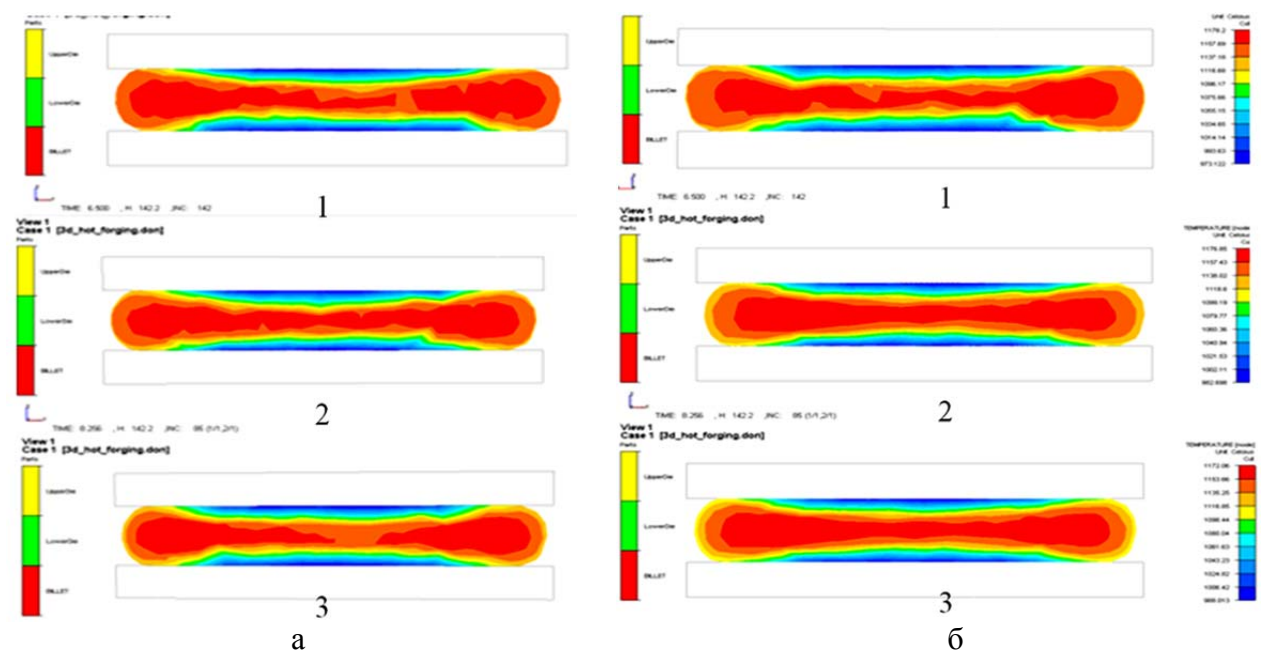


Рис. 3. Распределение температур при осадке заготовки из сплава ЭИ698-ВД при следующих параметрах:  
 а – температура инструмента 20 °С; 1 – без паузы; 2 – с паузой 5 с; 3 – с паузой 10 с;  
 б – температура инструмента 420 °С; 1 – без паузы; 2 – с паузой 5 с; 3 – с паузой 10 с

Рассмотрим распределение температуры. Это фактор, который также значимо влияет на качество получаемой продукции. Зоны распределения температур при наличии и отсутствии междеформационных пауз приведены на рис. 3. В целом картина распределения температур в том и другом случае похожа, но только можно отметить, что при наличии междеформационной паузы и с увеличением температуры инструмента неравномерность распределения температур очень незначительно, но снижается. Это связано в большей степени с тем, что повышение температуры инструмента снижает потери тепла заготовки, а междеформационная пауза позволяет в большей степени выравнять температуру по сечению заготовки.

### ВЫВОДЫ

Рассмотрено формоизменение металла при выполнении одной из основных кузнечных операций – осадки. При этом в качестве материала для осадки выбран жаропрочный сплав ЭИ698-ВД, который производится в условиях ПАО «Днепрспецсталь». Основным отличием существующей работы состоит в том, что исследовалось влияние междеформационной паузы на распределение показателей напряженно-деформированного состояния и температуры. Именно эти показатели и формируют в конечном итоге качество получаемой продукции – поковок. Результаты расчета показали, что наличие междеформационных пауз при осадке сплава ЭИ698-ВД благотворно влияют на снижение неравномерности деформации при осадке при одновременном (но незначительном) увеличении сжимающих напряжений в центральной части заготовки при практически неизменном температурном поле заготовки. Можно сделать вывод о том, что использование междеформационных пауз при осадке заготовки из сплава ЭИ698-ВД должно повысить качество получаемой продукции в условиях ПАО «Днепрспецсталь».

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шнейберг А. М. Экспериментальные исследования предельной пластичности при осадке без кручения и с кручением / А. М. Шнейберг, Ф. П. Михаленко, Д. А. Щербатов // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2012. – № 1. – С. 18–24.*
2. Тюрин В. А. Стадийность процесса и потокораспределение при осадке плитами с осевым отверстием / В. А. Тюрин, М. Б. Савонькин // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2009. – № 3. – С. 17–20.*
3. Воронцов А. Л. Пластическое течение при осадке полых заготовок / А. Л. Воронцов // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2007. – № 1. – С. 3–8.*
4. Охрименко Я. М. *Технология кузнечно-штамповочного производства* / Я. М. Охрименко. – М., Машиностроение, 1976. – 600 с.
5. *Ковка слитков на прессах* / Соколов Л. Н., Золотухин Н. М., Ефимов В. Н. и др. ; под ред. Соколова Л. Н. – К. : Техника, 1984. – 127 с.

Гринкевич В. А. – д-р техн. наук, проф. НМетАУ;  
Чухлеб В. Л. – канд. техн. наук, доц. НМетАУ;  
Сальников А. С. – канд. техн. наук, нач. ЦЗЛ ПАО «Днепрспецсталь»;  
Тумко А. Н. – канд. техн. наук, зам. нач. ЦЗЛ ПАО «Днепрспецсталь»;  
Ашкелянец А. В. – канд. техн. наук, доц. НМетАУ;  
Банашек Г. – Политехника Ченстоховска.

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепрпетровск.  
ПАО «Днепрспецсталь» – Публичное акционерное общество «Электрометаллургический завод «Днепрспецсталь» им. А. Н. Кузьмина», г. Запорожье.  
Политехника Ченстоховска, г. Ченстохов, Польша.

E-mail: cvl1@mail.ru