

Ю.М. Антощенко, д.т.н., профессор (г. Электросталь), И.М. Таупек, аспирант
(СТИ НИТУ «МИСиС», г. Старый Оскол)

**Исследование состояния металла при осесимметричной осадке средствами
компьютерных технологий**

Возникающее в процессе осадки напряжённо–деформационное состояние заготовки оказывает решающую роль на формирование необходимых потребительских качеств готовых изделий. В реальных условиях анализ состояния металла во время протекания процесса затруднён, а подчас является просто невозможным, однако, с развитием современных способов и систем численного моделирования [1,2] в руках исследователей появился мощный и доступный инструментарий, позволяющий проникать вглубь процессов во время их непосредственно протекания.

При этом одним из главных проблем остаётся достоверность получаемых при моделировании результатов. Для проверки адекватности результатов моделирования в САПР SolidWorks [3] были созданы три цилиндрических образца, со следующими соотношениями:

H_0/D_0 : 3,75; 1,875; 1,25 (D_0/H_0 : 0,27; 0,53; 0,8). Их исходные размеры показаны на рис. 1.

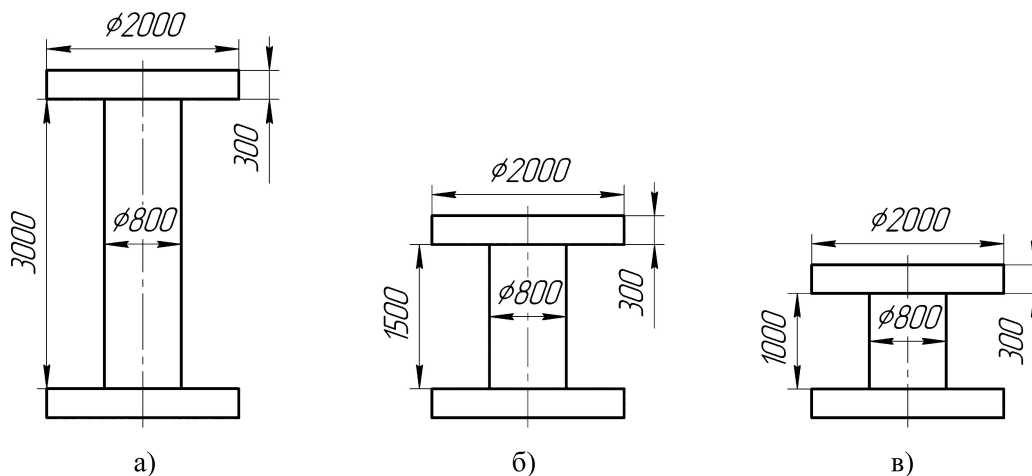


Рис. 1 – Размеры применяемых образцов и инструмента

Далее построенные модели импортировались в систему моделирования Simufact

Forming. Данный программный комплекс позволяет осуществлять моделирование большинства процессов обработки металлов давлением. В решении задач может использоваться как метод конечных элементов, так и метод конечных объёмов [4]. Встроенная база данных материалов не содержит обширного сортамента отечественных марок сталей, поэтому при моделировании заготовкам были присвоены реологические свойства стали С45 (немецкий аналог отечественной стали 45), температура заготовки на момент начала деформации была равномерна по всему сечению и составляла 1200°С. Для описания сил трения, возникающих между рабочим инструментом и поковкой, использовался закон Амонтона–Кулона, коэффициент трения составлял 0,3. Скорость перемещения верхней плиты была постоянной и составляла 50 мм/сек. Итоговая степень деформации для всех трёх образцов составляла 83,3%.

Согласно данным из литературных источников [5,6] при осадке высоких образцов в них образуются различные зоны распределения деформаций, показанные на рис. 2. Так, к рабочему инструменту примыкают зоны 1 – области затруднённой деформации, к ним примыкают зоны локализованной деформации 2, в которых действуют максимальные тангенциальные напряжения под углом 45° к оси образца. На боковых поверхностях возникают зоны 3, в которых возникают растягивающие напряжения (в данном случае таких зон две и они расположены в верхней и нижней частях заготовки). В центре заготовки образуется зона 4 с равномерным распределением наиболее высоких значений деформации (рис. 2а). В начальной стадии процесса происходит «двойное бочкообразование», которое исчезает при продолжении процесса. При этом происходит слияние двух зон 3 в одну, а также переход зоны 4 в поверхностных слоях металла в 3, которая теперь остаётся единственной кольцевой зоной (рис. 2б). Далее зона 4 полностью поглощается зонами 2, которые после объединения образуют общую, имеющую крестообразную форму (рис. 2в). При дальнейшей осадке наблюдается развитие зон 1, которые до этого не претерпевали значительных изменений: значения деформаций в них были гораздо ниже, чем в других зонах. В финальной стадии процесса зоны 1 разделяются на 1', в которой значения деформаций так и остаются крайне небольшими и, окружающей её, 1'', с более высокими значениями, также в эту область частично перемещается и зона 3, уже имеющая более высокие (по сравнению с 1') значения деформаций (рис. 2г).

Описанные области не имеют резко очерченных границ и, в свою очередь, характеризуются неравномерностью деформации (зональной неравномерностью) [7].

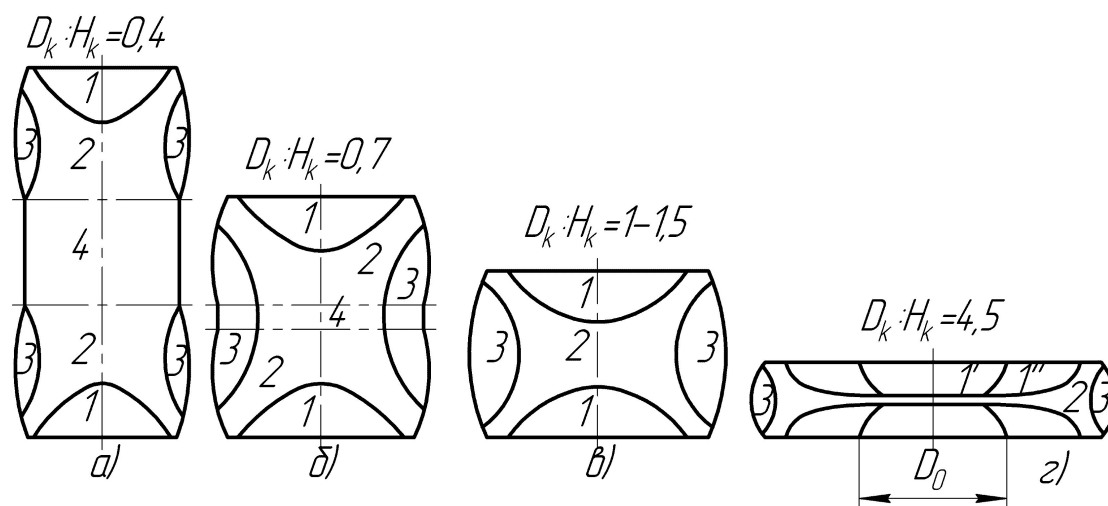


Рис. 2 – Форма зон в объёме осаживаемого высокого цилиндрического образца

Распределение интенсивности деформаций в сечении заготовки при моделировании осадки первого образца показано на рис. 3. Значения в процентах под изображениями показывают степень относительной деформации. Для большей наглядности была выбрана шкала с резким цветовым переходом от одного значения к другому, позволяющая наблюдать образование и развитие различных зон. Как описывалось выше, при реальной осадке границы стыковки зон размыты.

Полученные результаты совпадают с описанными ранее: непосредственно под осадочными плитами происходит образование как зон затруднённой деформации, так и кольцевых зон (рис. 3а). При этом происходит двойное бочкообразование, которое сопровождается развитием двух выраженных очагов деформации в верхней и нижней частях заготовки под зонами затруднённой деформации (рис. 3б и 3в). При дальнейшей осадке происходит их соприкосновение (рис. 3г), с последующим слиянием и развитием получившегося общего очага в центральной области заготовки, что вызывает распространение повышенных значений деформации преимущественно в радиальном направлении (рис. 3д и 3е). Получившаяся в итоге зона оказывается сплюснута сверху и снизу зонами затруднённой деформации, которые, по сути выступают в роли продолжения осадочных плит [8].

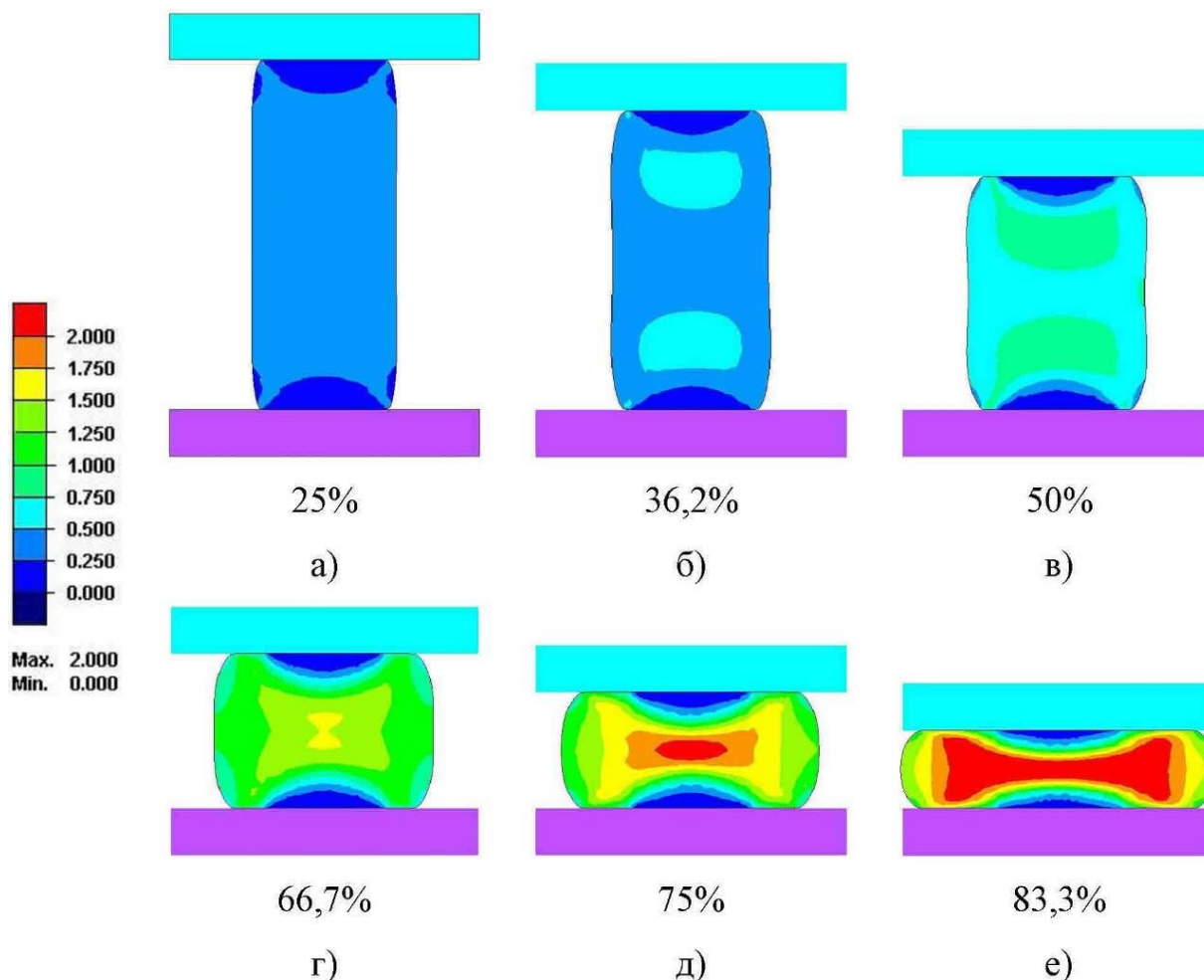


Рис. 3 – Распределение интенсивности деформаций при осадке первого образца

Боковые области имеют более низкие значения деформаций, т.к. при осадке они не контактировали ни с рабочим инструментом, ни с зонами затруднённой деформации, а перемещение их внешней поверхности не было чем-либо ограничено, т.е. не испытывало внешнего давления и происходило свободное течение металла.

На протяжении большей части процесса величина зон затруднённой деформации изменяется мало. Лишь при больших степенях деформации (более 75–80%) происходит расслоение зон на центральную часть с минимальными значениями деформаций и окружающую её область с более высокими значениями (полученными в том числе и путём перехода в них металла с боковой поверхности заготовки) [9], причём данное расслоение наблюдается больше в вертикальном направлении. Уменьшению зон в горизонтальном направлении препятствуют силы контактного рения, которые также являются причиной появления данных областей. После окончания осадки непосредственного соединения зон

затруднённой деформации не происходит: между ними остаётся прослойка металла с максимальными значениями деформаций.

Распределение интенсивности напряжений при осадке первого образца показано на рис. 4.

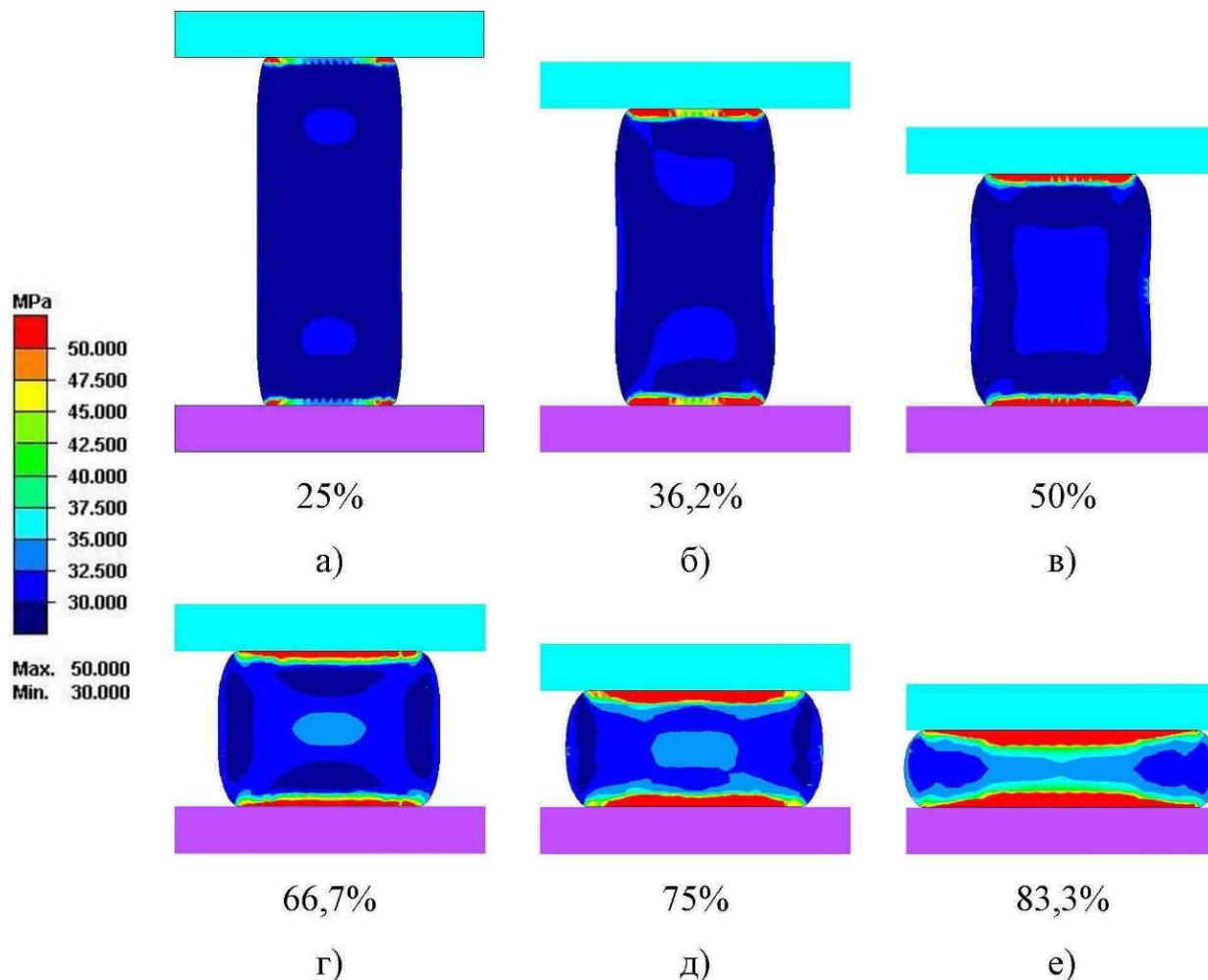


Рис. 4 – Распределение интенсивности напряжений при осадке первого образца

В начальных стадиях процесса наибольшие значения напряжений проявляются в зоне контакта плит и заготовки, это вызвано как более интенсивным остыванием заготовки вследствие теплообмена, так и силами трения, препятствующими течению поверхностных слоёв металла в радиальном направлении. Также наблюдается возникновение очагов повышенных значений в местах образования очагов деформации под зонами затруднённой деформации (рис. 4а и 4б). При дальнейшей осадке происходит слияние этих очагов в один (рис. 4в).

При дальнейшем процессе полученный очаг повышенных значений приобретает крестообразную форму, при этом также увеличиваются области с наибольшими напряжениями в зонах контакта заготовки с плитами (рис. 4г и 4д). В финале процесса вышеупомянутые зоны практически соприкасаются, при этом в боковых областях наблюдаются наиболее низкие значения напряжений (рис. 4е). Несмотря на наиболее высокие значения интенсивности напряжений в местах контакта металла с плитами именно в данных областях образуются зоны затруднённой деформации. Подобная картина во многом вызвана силами контактного трения, которые затрудняют перемещение металла в радиальном направлении.

Распределение интенсивности деформаций при осадке второго образца показано на рис. 5. Как видно, начальная стадия процесса заметно отличается от первого образца: отсутствует двойное бочкообразование, заметное уширение начинается сразу со средней части (рис. 5а). Также сразу, в центральной области, образуется один очаг повышенных значений деформаций, который при дальнейшей осадке начинает развиваться (рис. 5б и 5в). При этом образуются развитые зоны затруднённой деформации, их величина сопоставима с зонами первого образца (который имеет такой же диаметр), но, т.к. высота второго образца меньше, то образовавшиеся зоны занимают больший относительный объём и проникают ближе к центру (рис. 5г и 5д). При этом в самих областях, прилегающих к плитам, значения деформаций оказываются выше, чем у первого образца (рис. 5е). Можно сделать вывод, что зоны затруднённой деформации состоят по большей части из области 1" рисунка 2, а область 1' занимает небольшой объём непосредственно под плитой в осевой зоне образца.

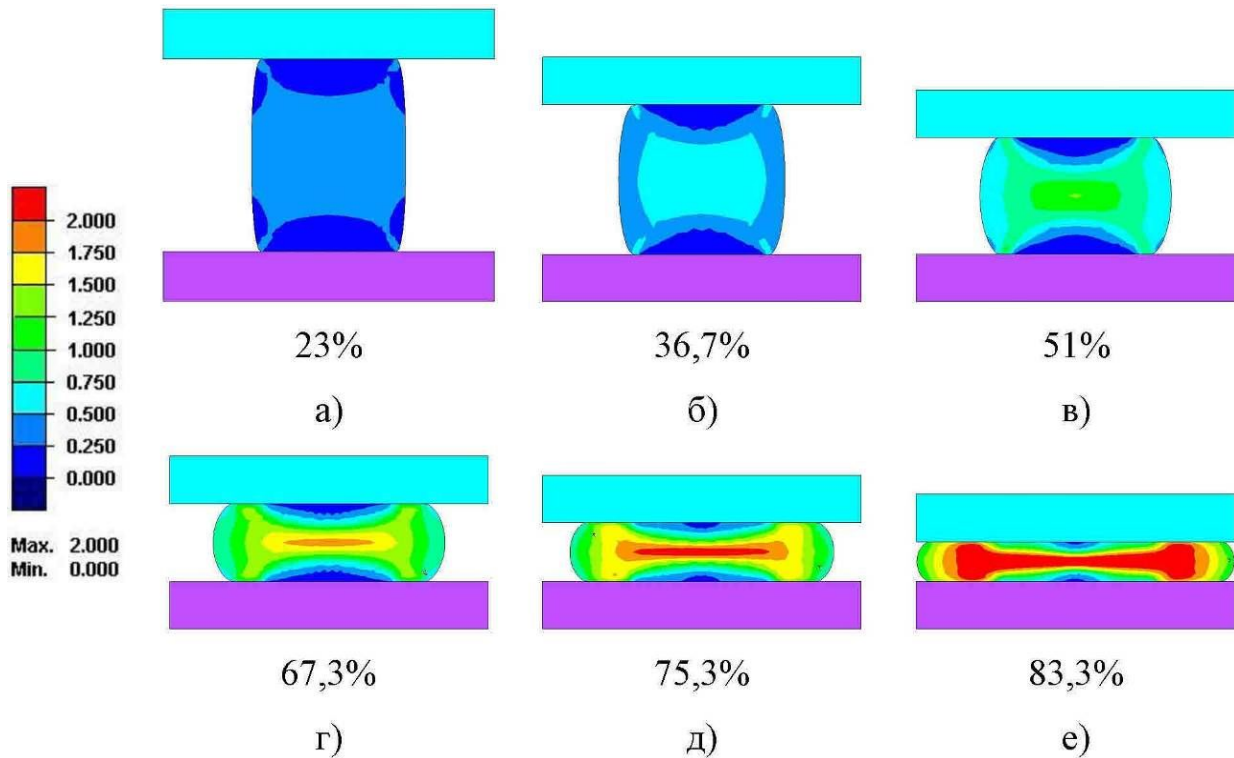


Рис. 5 – Распределение интенсивности деформаций при осадке второго образца

Зона максимальных значений, как и у первого образца, вытянута в радиальном направлении, но более сплюснута в вертикальном, что объясняется исходным соотношением размеров образца.

Распределение интенсивности напряжений, показанное на рис. 6, также отличается от данных первого образца. Как и при распределении деформаций, наблюдается изначальное формирование только одного очага повышенных значений, расположенного в центральной области (рис. 6а). Максимальные значения интенсивности напряжений наблюдаются в виде кольцевой зоны, расположенной в местах контакта с плитами [10]. При дальнейшей осадке зона повышенных значений в центре постепенно увеличивает и приобретает крестообразную форму (рис. 6б и 6в). Как и при осадке первого образца происходит увеличение зон с максимальными значениями напряжений, расположенные под плитами. При дальнейшей осадке происходит заполнение кольцевых зон максимальных значений и изменение их формы в куполообразную. Одновременно на границе данных зон (на данных местах до этого располагались области с минимальными значениями интенсивности напряжений) появляются области повышенных значений в виде их продолжения, которые превышают возникавшие до этого напряжения в центральной области образца (рис. 6г). Затем происходит смыкание

данных областей и повышение значений интенсивности напряжений (рис. 6д и 6е).

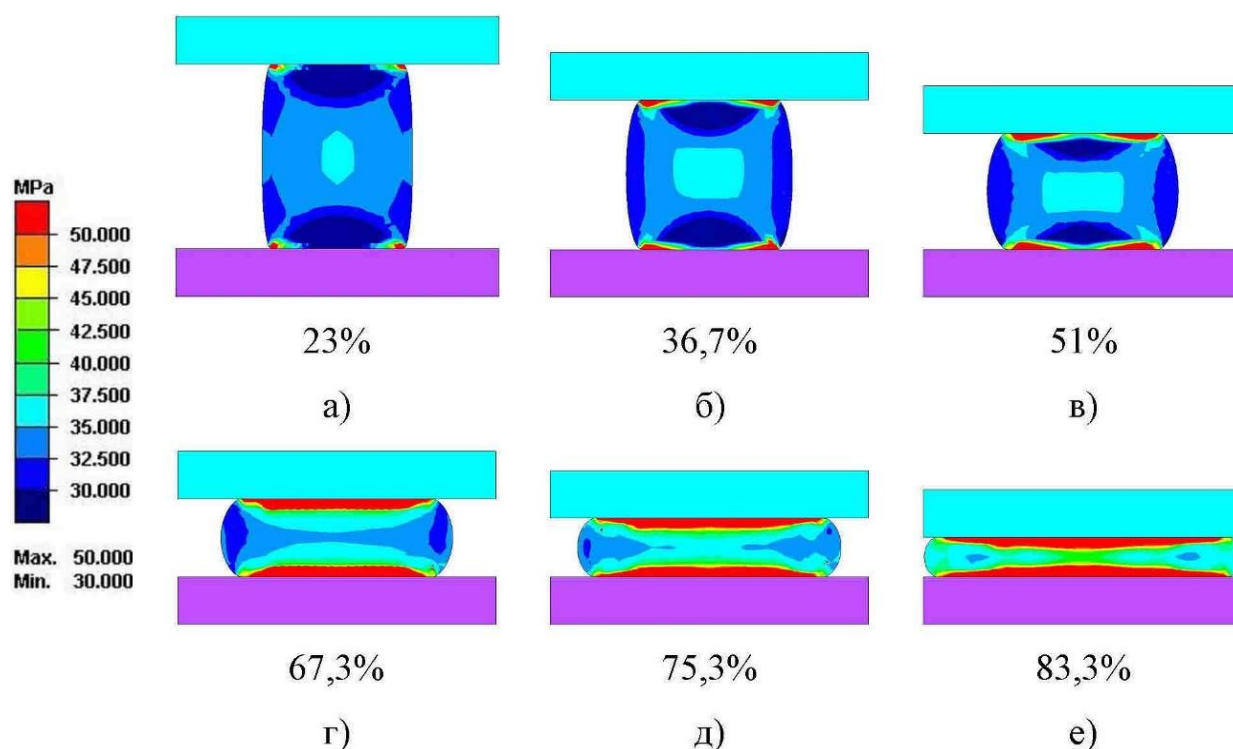


Рис. 6 – Распределение интенсивности напряжений при осадке второго образца

Распределение интенсивности деформаций при осадке третьего образца показано на рис. 7. В целом, полученная картина ближе к распределению при осадке второго образца: также уширение происходит без двойного «бочкообразования», а в средней части образца (рис. 7а). Повышенные значения деформаций также возникают в центре заготовки и при дальнейшей осадке их распределение приобретает ярко выраженную крестообразную форму (рис. 7б). Зоны затруднённой деформации занимают ещё больший относительный объём (рис. 7в). При этом уже при относительной степени деформации в 60% начинается заметное расслоение зоны 1 на 1' и 1'', причём вторая занимает значительный объём (рис. 7г и 7д). Область максимальных значений деформаций, как и в предыдущих образцах, вытянута в радиальном направлении и имеет гантелеобразную форму. В финале процесса граница между зонами затруднённой деформации и центральной областью более размытая, чем в двух предыдущих образцах: значения деформаций в самих зонах выше и они практически целиком состоят из областей 1'', малодеформированные 1' занимают крайне небольшие области в осевых зонах непосредственно под плитами (рис. 4е).

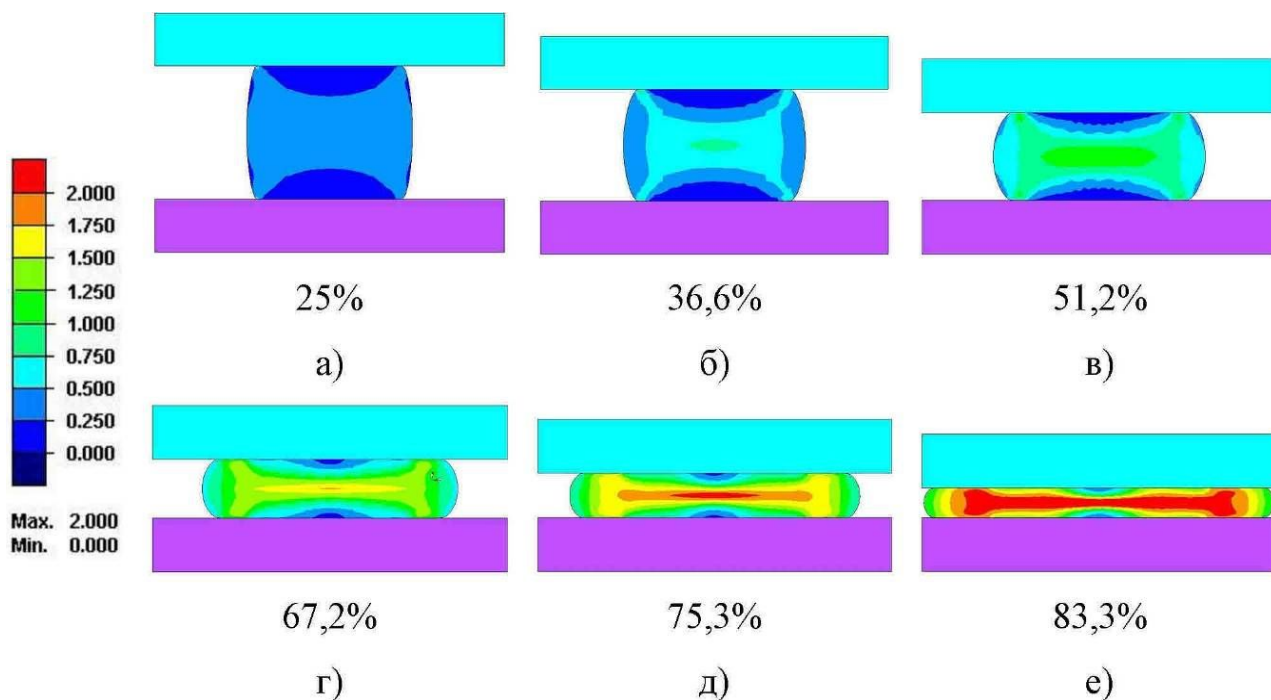


Рис. 7 – Распределение интенсивности деформаций при осадке третьего образца

Распределение интенсивности напряжений при осадке третьего образца показано на рис. 8. Как видно, уже при сравнительно небольшой деформации в центральной области образца возникает область повышенных значений, её местоположение соответствует началу распространения деформаций. При этом область также имеет крестообразную форму с максимальными значениями расположенными в кольцевых областях в местах контакта с плитами. Непосредственно внутри кольцевых зон, под плитами образуются зоны с минимальными значениями напряжений (рис. 8а). При дальнейшей осадке данные области заметно уменьшаются, также увеличиваются области с максимальными значениями (рис. 8б). При относительной деформации порядка 50% кольцевые зоны полностью заполняются и под плитами образуются сплошные зоны в виде сильно сплюснутых в вертикальном направлении куполов. Их окружают области с более низкими значениями сравнительно небольшого размера, которые переходят в центральную область с равномерным распределением напряжений (рис. 8в). Дальнейшая осадка вызывает развитие переходных зон и их слияние в центральной области (рис. 8г и 8д). При этом напряжения в центре продолжает возрастать вплоть до самого окончания процесса, но слияния зон с максимальными напряжениями, как и у предыдущих образцов, не происходит (рис. 8е).

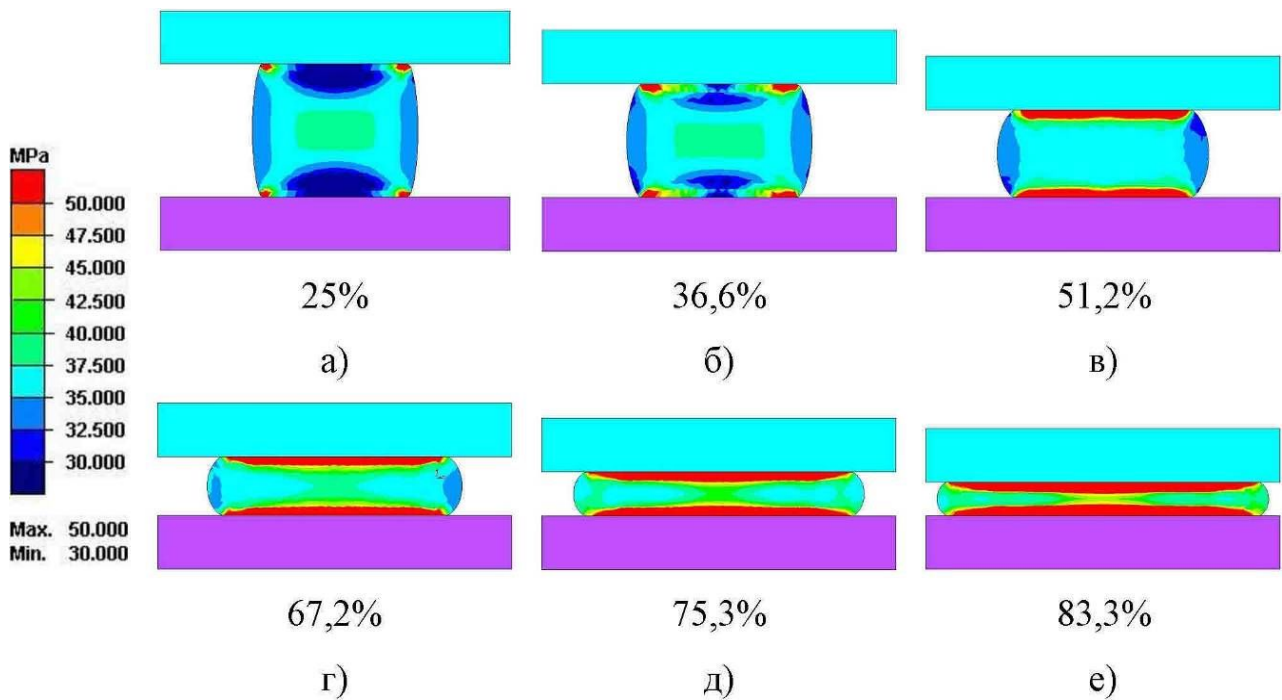
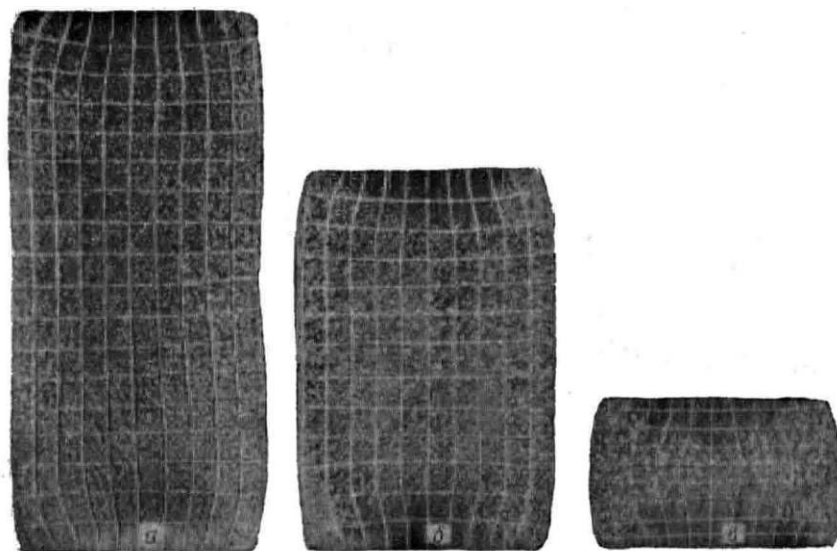


рис. 8 – Распределение интенсивности напряжений при осадке третьего образца

Для проверки полученных данных было проведено сравнение деформации координатных сеток, заложенных в моделируемые образцы с результатами физического эксперимента с применением свинцовых образцов, изображённых на рис. 9 [6], относительная степень деформации образцов составляла 30%.



$a - D_0/H_0 = 3,5$; $б - D_0/H_0 = 2,5$; $в - D_0/H_0 = 1,0$

рис. 9 – Деформация координатных сеток, расположенных в осевой плоскости разъёма

Simufact Forming позволяет задавать перед расчётом координатную сетку и затем наблюдать за её деформацией. Для первого образца сетка состояла 11 ячеек в ширину и 36 в высоту, для второго – 11 в ширину и 20 в высоту, для третьего – 11 в ширину и 13 в высоту. Подобные соотношения позволили создать сетки с ячейками квадратной формы.

Деформация координатной сетки при моделировании первого образца приведена на рис. 10. Наглядно видно появление двойного бочкообразования (рис. 10а – 10в) и его перехода в уширение центральной области (рис. 10г – 10е).

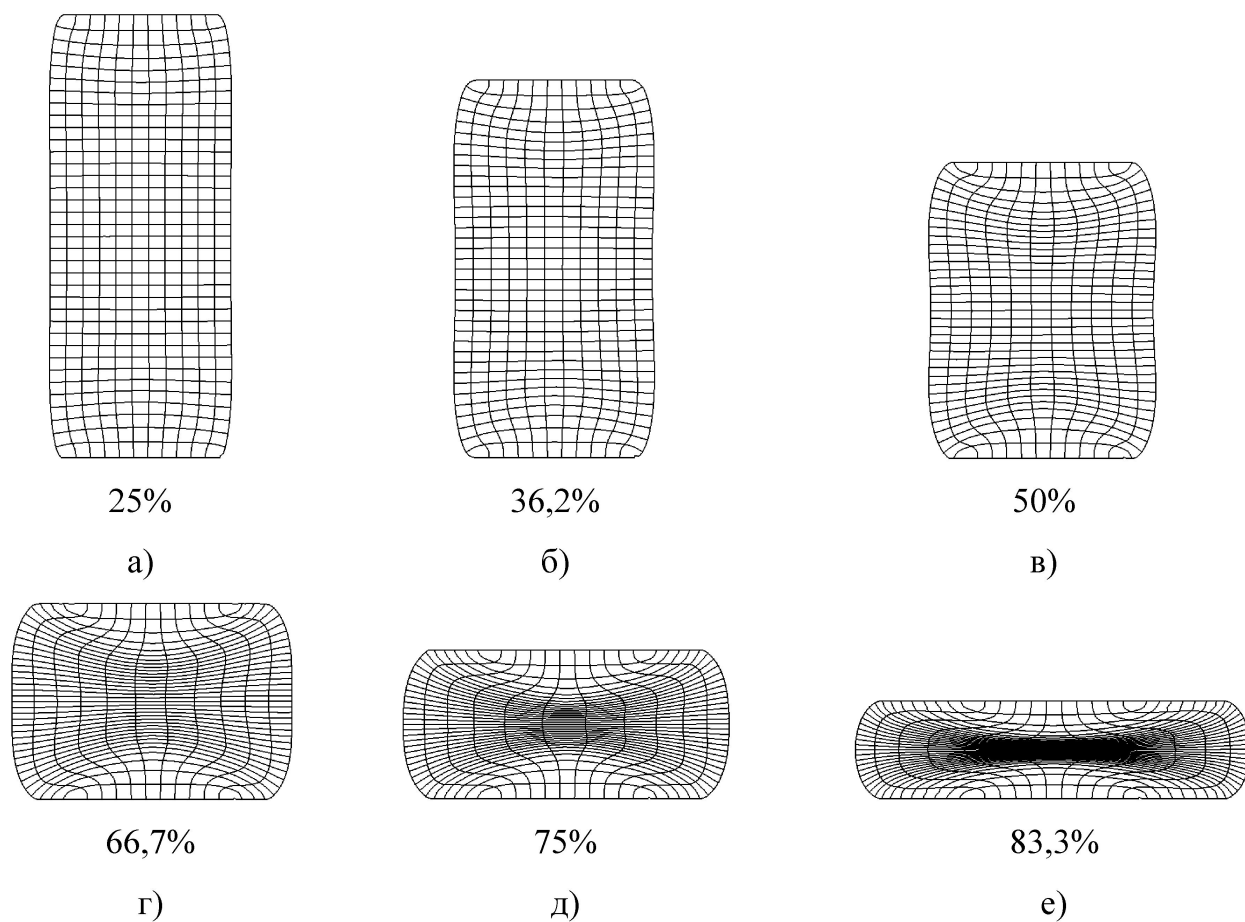


Рис. 10 – Деформация координатной сетки при осадке первого образца

Также заметно развитие зон затруднённой деформации (слабодеформированные ячейки в верхней и нижней областях) и появление очага с наибольшей деформаций в центральной области образца (ячейки сжаты в вертикальном направлении и вытянуты в радиальном).

Координатные сетки дают представление и о течении металла в боковых частях образца: происходит равномерное радиальное перемещение, т.к. вертикальные линии сетки практически не исказились.

Деформация координатной сетки второго образца показана на рис. 11. Максимальное искажение сетки сразу же начинается с центральной области. Также видны зоны затруднённой и наибольшей деформации, заметно изменение течения металла в боковых областях: оно более неравномерно, вертикальные линии заметно искажены на большем расстоянии от центра образца. Зоны затруднённой деформации довольно близко подходят друг к другу, но между ними остаётся зазор в виде наиболее деформированной области.

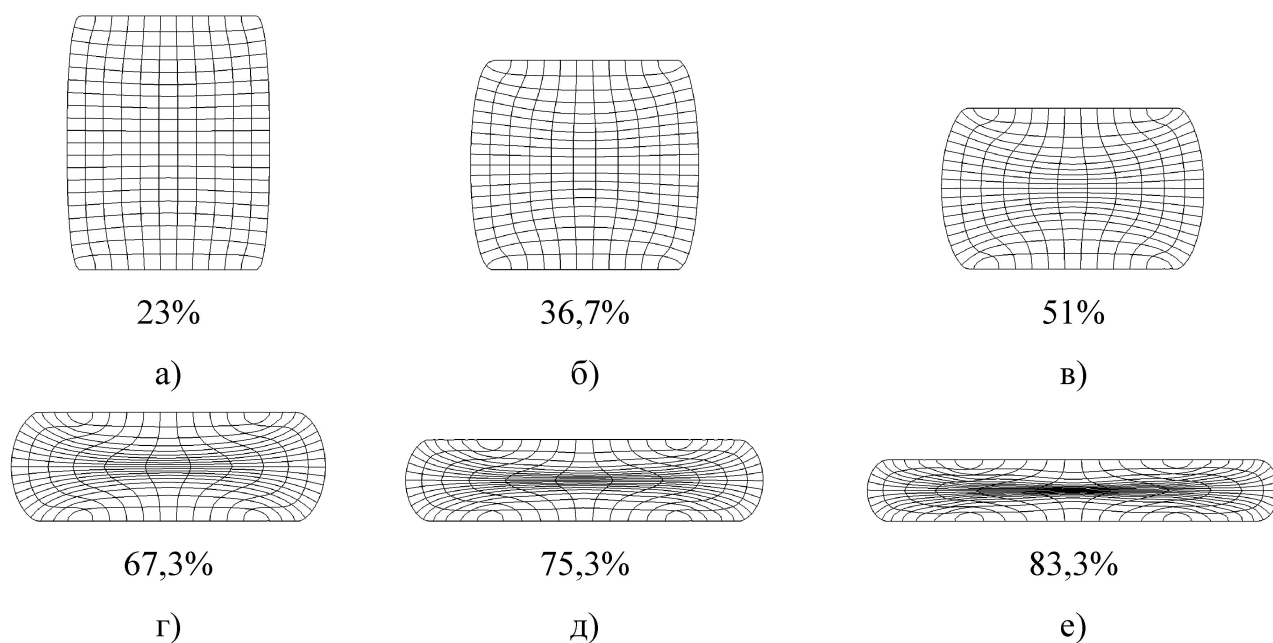


Рис. 11 – Деформация координатной сетки при осадке второго образца

На рис. 12 показана деформация сетки третьего образца. Первоначально картина искажения схожа со вторым образцом (рис. 12а и 12б), но уже при относительной деформации порядка 50% возникает более сильное неоднородное радиальное искажение сетки (рис. 12г), которое в дальнейшем значительно возрастает.

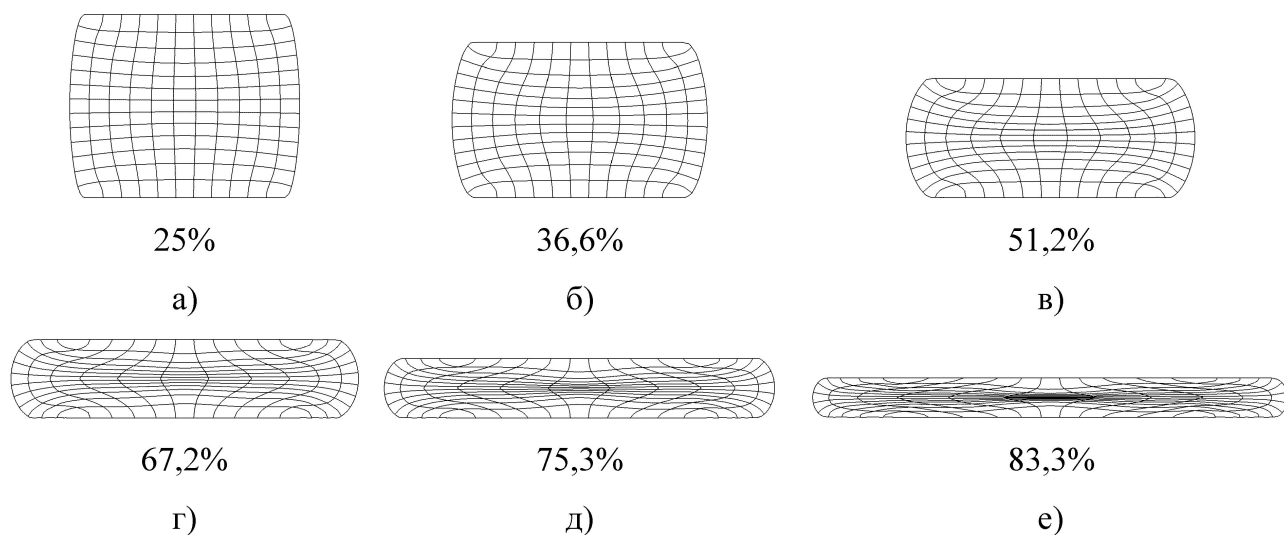


Рис. 12 – Деформация координатной сетки при осадке третьего образца

Также меняется картина изменения зон затруднённой деформации: достигнув максимального размера при тех же 51%, при дальнейшей осадке происходит их уменьшение (рис. 12г и 12д), вплоть до минимального значения в осевой области (рис. 12е). При этом их уменьшение вызвано не только сжатием в вертикальном направлении, но и растяжением в радиальном (заметные смещения ячеек).

Как видно, искажения сеток при моделировании в начальной стадии осадки полностью соответствуют реальному процессу, поэтому можно сделать вывод, что и дальнейшая деформация имеет с реальным процессом высокую степень совпадения.

Зависимость изменения усилий осадки от перемещения верхней плиты показана на рисунках 13 – 16. Для более детального рассмотрения начальной стадии процесса данная область диаграмм показана в большем масштабе отдельно справа. Итоговые значения усилий достигают высоких значений, так, для третьего образца свыше 850 МН, что значительно превышает возможности большинства существующих прессов, однако, данное моделирование выполнялось в виде теоретического исследования, без привязки к существующему оборудованию.

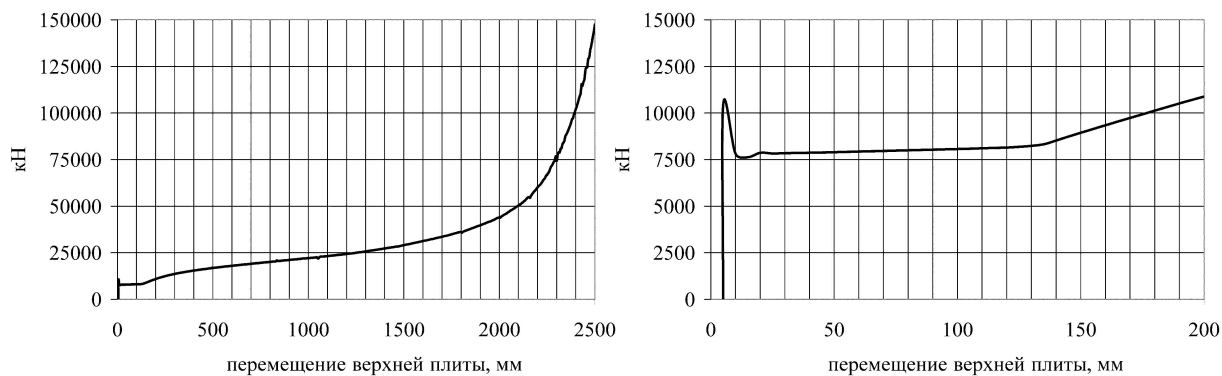


Рис. 13 – Усилия при осадке первого образца

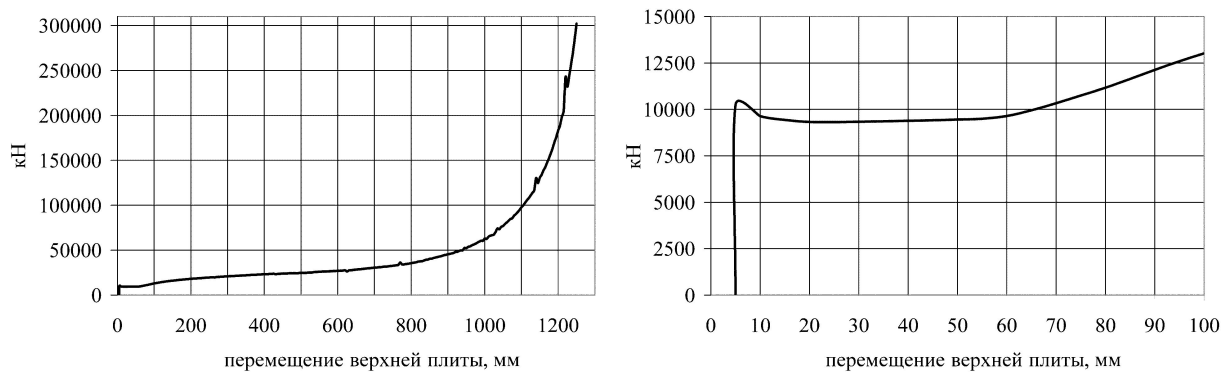


Рис. 14 – Усилия при осадке второго образца

Рис. 14 – Усилия при осадке второго образца

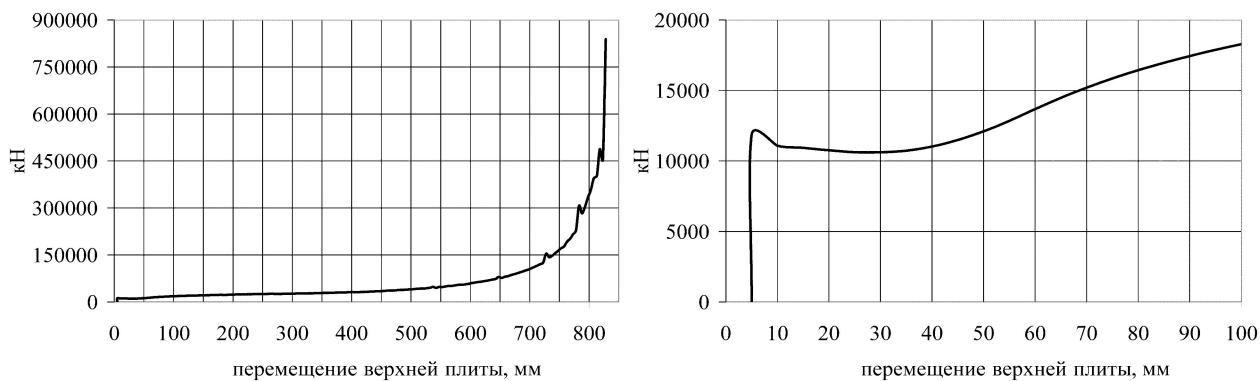
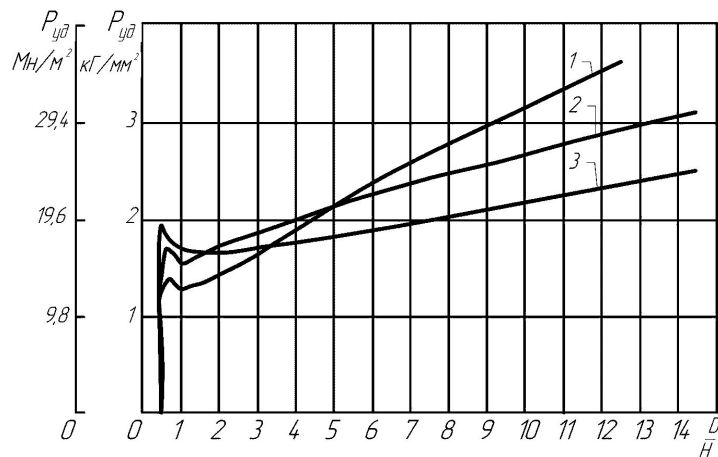


Рис. 15 – Усилия при осадке третьего образца

Как видно, при осадке всех трёх образцов, в начальной стадии процесса присутствует заметный «зуб текучести», за которым следует область с пониженными значениями усилий. При этом, чем меньше соотношение D/H исходного образца, тем сильнее проявляется понижение значений. Подобная картина полностью согласуется с выводами, изложенными в

[5] и показанными на рис. 16, а именно при осадке образцов с малым соотношением D/H увеличение контактных сил трения приводит к уменьшению сопротивления деформации в начальной стадии процесса. Изменение кривой зависимости наиболее соответствует графику 3 с данного рисунка (т.к. вся поверхность моделируемой плиты имеет одинаковые свойства, как и хорошо отшлифованная плита).



1 – грубая очистка плит; 2 – чистовая обработка плит;
3 – шлифованные слабосмазанные плиты

Рис. 16 – Влияние величины сил трения на удельное усилие осадки высоких образцов из свинца ($D_0/H_0 = 0,5$)

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что осесимметричное напряжённо-деформационное состояние заготовки при осадке позволило с высокой точностью описать течение металла при моделировании и, как следствие, получить качественную сходимость полученных результатов с данными реальных процессов. Это позволяет использовать данную методику моделирования для дальнейшего анализа процессов обработки металлов давлением.

Список использованных источников

1. Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением. Рыбин Ю.И., Рудской А.И., Золотов А.М. Санкт-Петербург. Наука, 2004. 645 с.
2. Гун Г. Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением.

М.: Металлургия. 1983.

3. Антощенко Ю. М., Таупек И. М., Горбачев Д. С. Возможностьковки заготовок из высоколегированных сталей и сплавов на радиально-обжимных машинах. Кузнечно-штамповочное производство. №1, 2013, Стр. 38-41.

4. Моделирование методом конечных элементов напряженно деформированного состояния заготовки при протяжке в трапециевидных бойках. Смайлова Н. Т., Машеков С.А., Нуртузаев А. Е. Тяжелое машиностроение, № 10, 2013, стр. 42-46.

5. Технология кузнечно-штамповочного производства. Охрименко Я.М. М. Машиностроение, 1966. 601с.

6. Теория процессовковки. Охрименко Я.М., Тюрин В.А. Учеб. Пособие для вузов. М., «Высш. школа», 1977. 295 с.

7. Тюрин В.А., Мохов А.И. Теория обработки металлов давлением: Учебник для вузов / Под ред. проф. В.А. Тюрин. Волгоград: РПК «Политехник», 2000.

8. Суворов И.К. Обработка металлов давлением. - М.: Высшая школа, 1973. - 384 с.

9. Теория пластических деформаций металла. Е. П. Унксов и др. М.: Машиностроение, 1983.

10. Ли К., Кобояси С. Анализ осесимметричной осадки и поперечной осадки в условиях плоской деформации сплошных цилиндрических заготовок методом конечных элементов. Тр. Американского об-ва инженеров – механиков. Сер. В. 1971. № 2.