

## РАЗРАБОТКА И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗАГОТОВОК ТИПА ПЛИТ И ПЛАСТИН ИЗ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

*С.Н. Лежнев<sup>1</sup>, Е.А. Панин<sup>1</sup>, А.О. Толкушкин<sup>1</sup>, Д.В. Куис<sup>2</sup>, Г.А. Сивякова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Карагандинский государственный индустриальный университет, г. Темиртау, Казахстан

<sup>2</sup> Белорусский государственный технологический университет, г. Минск, Беларусь

В своем послании народу Казахстана «Казахстанский путь – 2050: Единая цель, единые интересы, единое будущее» Глава государства Нурсултан Назарбаев отметил, что индустриальное развитие Казахстана не возможно без развития перерабатывающей (обрабатывающей) отрасли. При этом стратегия развития обрабатывающая промышленность должна развиваться в несколько этапов. На первом этапе необходимо совершить модернизационный рывок, чтобы обеспечить создание сильного обрабатывающего индустриального сектора. На втором этапе планируется формирование мощной обрабатывающей промышленности. Широко развитые должны получить и инжиниринговые услуги, как база для наукоемкой экономики. Одним из основных направлений реализации данной стратегии является строительство в Казахстане новых и модернизация старых предприятий по обработке черных и цветных металлов и сплавов обработкой давлением, которые будут выпускать конкурентоспособную продукцию не только на внутреннем рынке, но и на международном.

На данный момент в мире известно множество энергосберегающих технологий, позволяющих получать высококачественные металлоизделия прокаткой, ковкой, прессованием и другими способами обработки давлением. При ковке эта задача успешно решается при деформировании металлов в специальных инструментах, реализующих сдвиговые и знакопеременные деформации во всем объеме деформируемого металла. Так как именно реализация интенсивной сдвиговой деформации в процессековки поковок из черных и цветных металлов приводит к существенному изменению исходной микроструктуры и повышению физико-механических свойств деформированного металла.

К инструментам, позволяющим осуществлять деформацию металла путем сдвига, можно отнести ступенчатые бойки (рис. 1а) [1] и бойки, имеющие в поперечном сечении профиль в форме клина (рис. 1б) [2, 3]. Данные конструкции бойков позволяют реализовывать интенсивные сдвиговые деформации по всему объему деформируемого металла в процессе протяжки заготовок для получения поковок типа плит и пластин из черных и цветных металлов и сплавов. При этом интенсификация сдвиговых деформаций при ковке в ступенчатых бойках происходит в большей степени продольном направлении, а при использовании клиновидных бойков наоборот в поперечном направлении.

На кафедре «Обработки металлов давлением» Карагандинского государственного индустриального университета была предложена идея совместить две конструкции бойков: ступенчатого и клинового (рис. 2). Совмещение этих двух конструкций бойков позволит при незначительных энергозатратах интенсифицировать сдвиговые деформации как в продольном, так и в поперечном направлениях.



a)



Рис. 1. Известные конструкции бойков; а – ступенчатые; б, в – клиновые

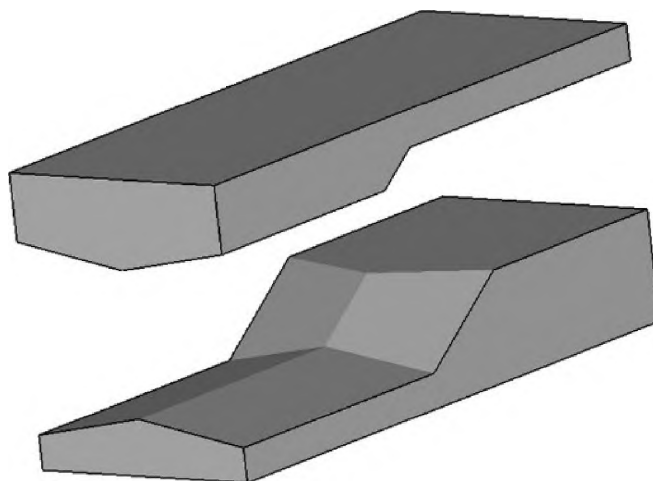


Рис. 2. Новая конструкция ступенчато-клиновых бойков

При разработке технологического процессаковки заготовок на новых бойках и выборе соответствующего оборудования большое значение имеют величина усилия и напряженно-деформированное состояние, возникающее при деформировании. Так как именно анализ деформированного состояния позволяет изучить распределение накопленной деформации во всем объеме заготовки при деформировании, выявить те зоны, которые в большей мере подвержены деформации, а на основе этого определить рациональные как геометрические, так и технологические параметры деформирования. Исследование напряженного состояния также является важным этапом при разработке нового технологического процесса. Поскольку изучение распределения напряжений в заготовке при деформировании позволяет выявить зоны, подверженные образованию дефектов из-за возникновения в них больших растягивающих напряжений. Это дает возможность внести необходимые коррективы для снижения интенсивности растягивающих напряжений и тем самым предотвратить образование дефектов. Для определения этих величин используют различные методы. Одним из таких методов является метод компьютерного моделирования.

Моделирование различных процессов деформирования в обработке металлов давлением является актуальной задачей, поскольку оно позволяет исследователю заглянуть «внутрь» процесса, оценить возникающие напряжения и деформации, предсказать появление дефектов. Также моделирование позволяет выявить рациональные параметры инструмента и заготовки для наилучшего протекания процесса. А современные программные комплексы моделирования предоставляют широчайшие возможности для работы. Они позволяют смоделировать практически любой процесс, минуя дорогостоящие эксперименты.

Для проведения исследования были построены 3 модели бойков: клиновой, с углом клина  $170^\circ$ . Данное значение угла клина было выбрано, поскольку в работе [2] было доказано, что наиболее оптимальное распределение НДС возникает при больших углах клина (от 160 до 180). Также были построены ступенчатые бойки с клином и плоские ступенчатые бойки. В качестве материала для заготовки был выбран алюминий.

После моделирования процесса протяжки через бойки, было проведено сравнение по следующим параметрам: критерий разрушения, эквивалентная деформация, эквивалентное напряжение, гидростатическое давление и усилие ковки. Данные параметры рассматривались в следующих зонах: в клиновых бойках рассматривалось поперечное сечение заготовки (рис. 3а); в ступенчато-клиновых и ступенчатых бойках данные параметры рассматривались на наклонном участке, в сечении перпендикулярном наклонной грани (рис. 3б, 3в), поскольку именно на этом участке реализуется деформация сдвига у ступенчатых бойков. На рисунках 4-8 приведены результаты моделирования.

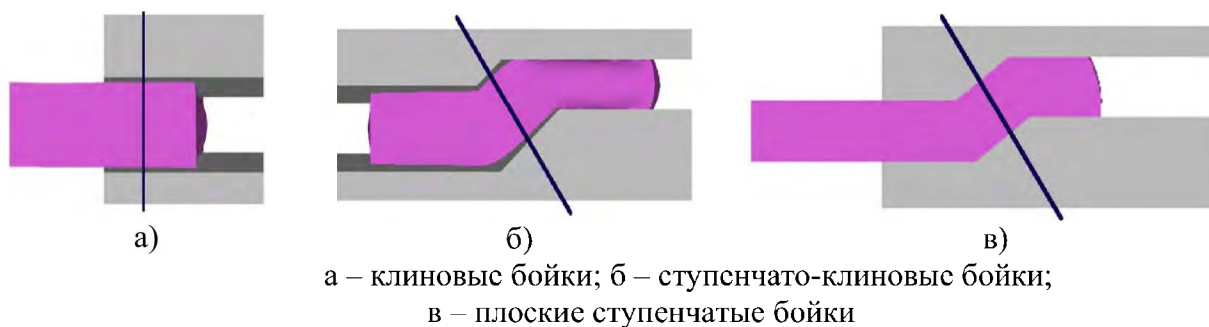


Рис. 3. Схемы расположения сечений для изучения НДС

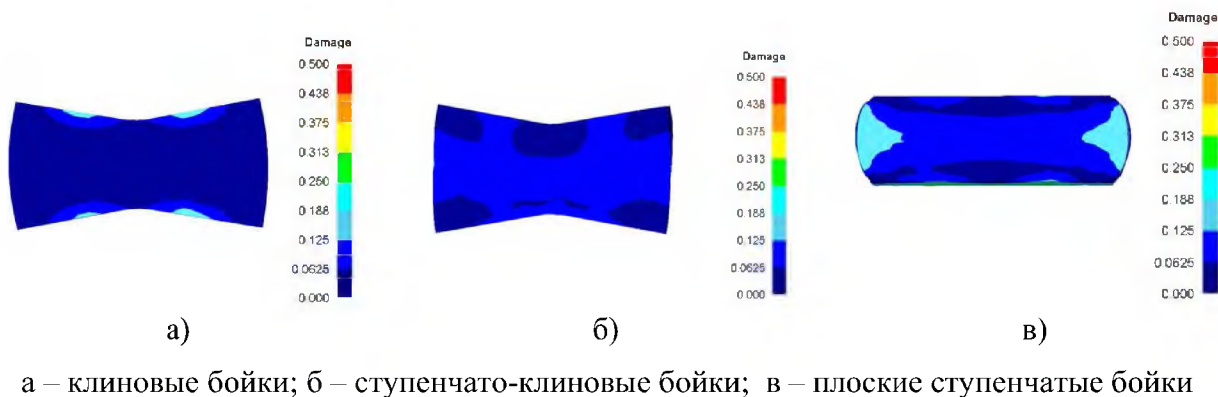
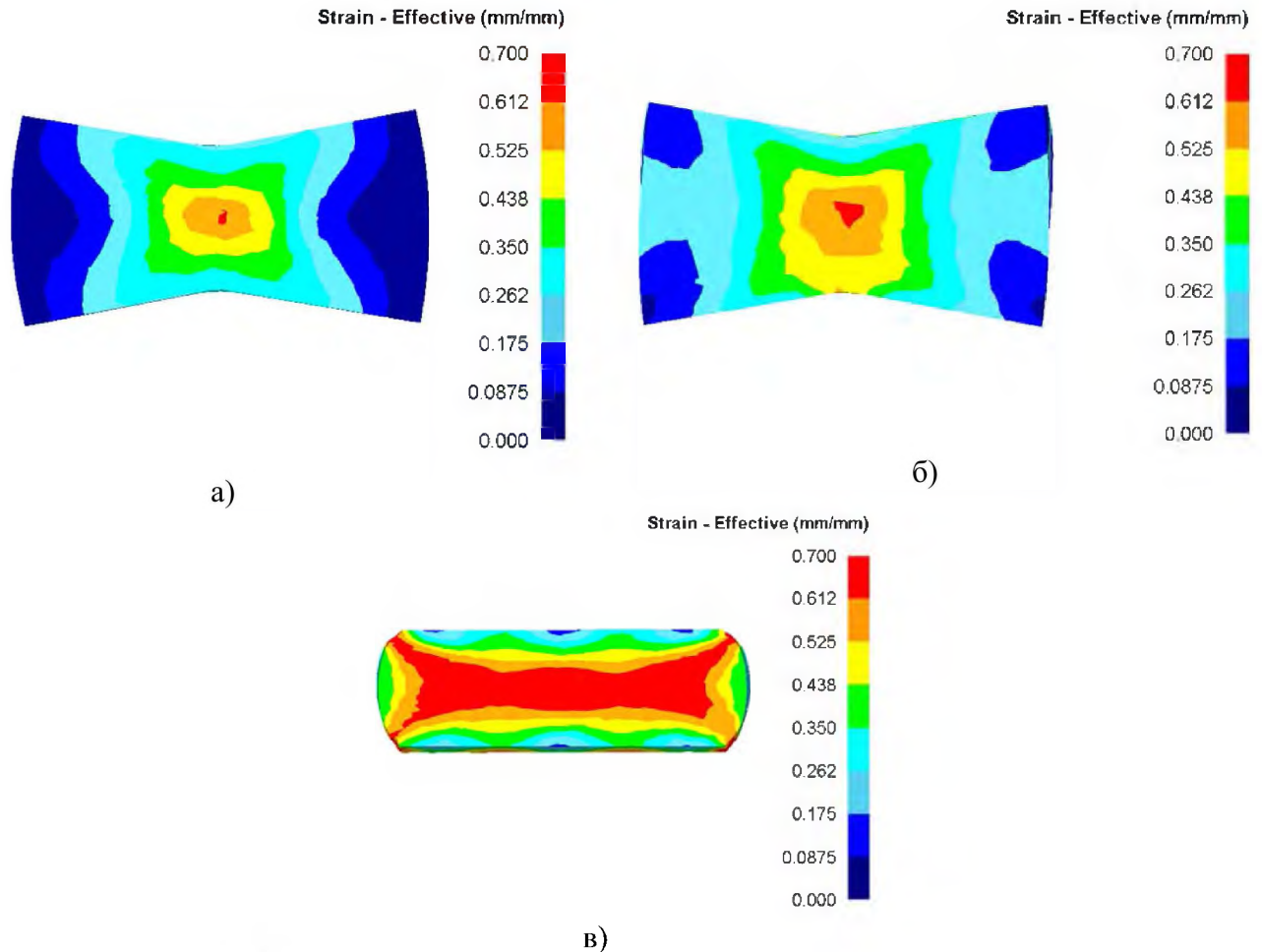


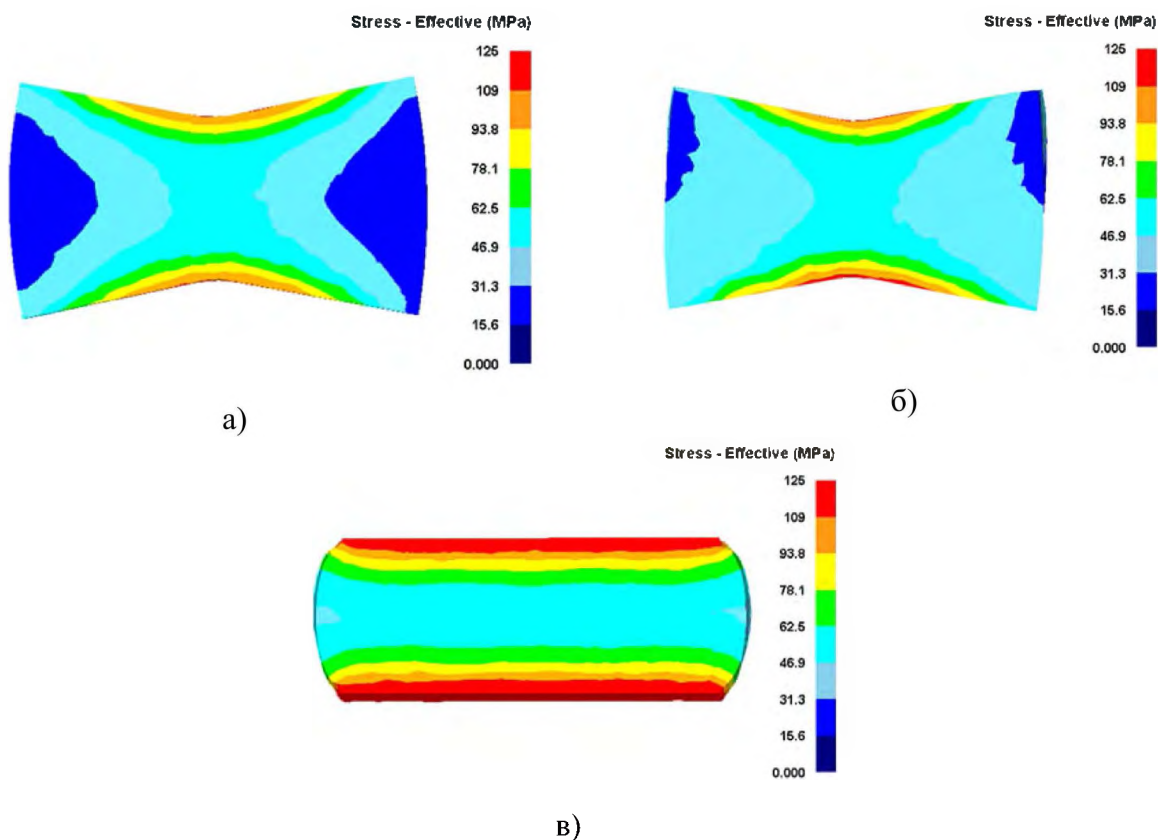
Рис. 4. Критерий разрушения

На рисунке 4 приведены значения критерия разрушения для трех исследуемых образцов. Критерий разрушения показывает степень действия растягивающих напряжений, которые негативно влияют на механические свойства металлов и ведут к образованию дефектов. При сравнении трех моделей видно, что наибольшее значение критерия разрушения имеет заготовка, продеформированная на плоских ступенчатых бойках. В то же время заготовки, продеформированные в клиновых и ступенчато-клиновых бойках, имеют значительно меньшее значение критерия разрушения. Большое значение критерия разрушения на торцевой поверхности заготовки, деформированной на плоских бойках, возникает из-за бочкообразования при осадке. С другой стороны клин, кроме интенсификации сжимающих напряжений в осевой части заготовки, снижает интенсивность растягивающих напряжений, почти предотвращая образование бочки в заготовке.



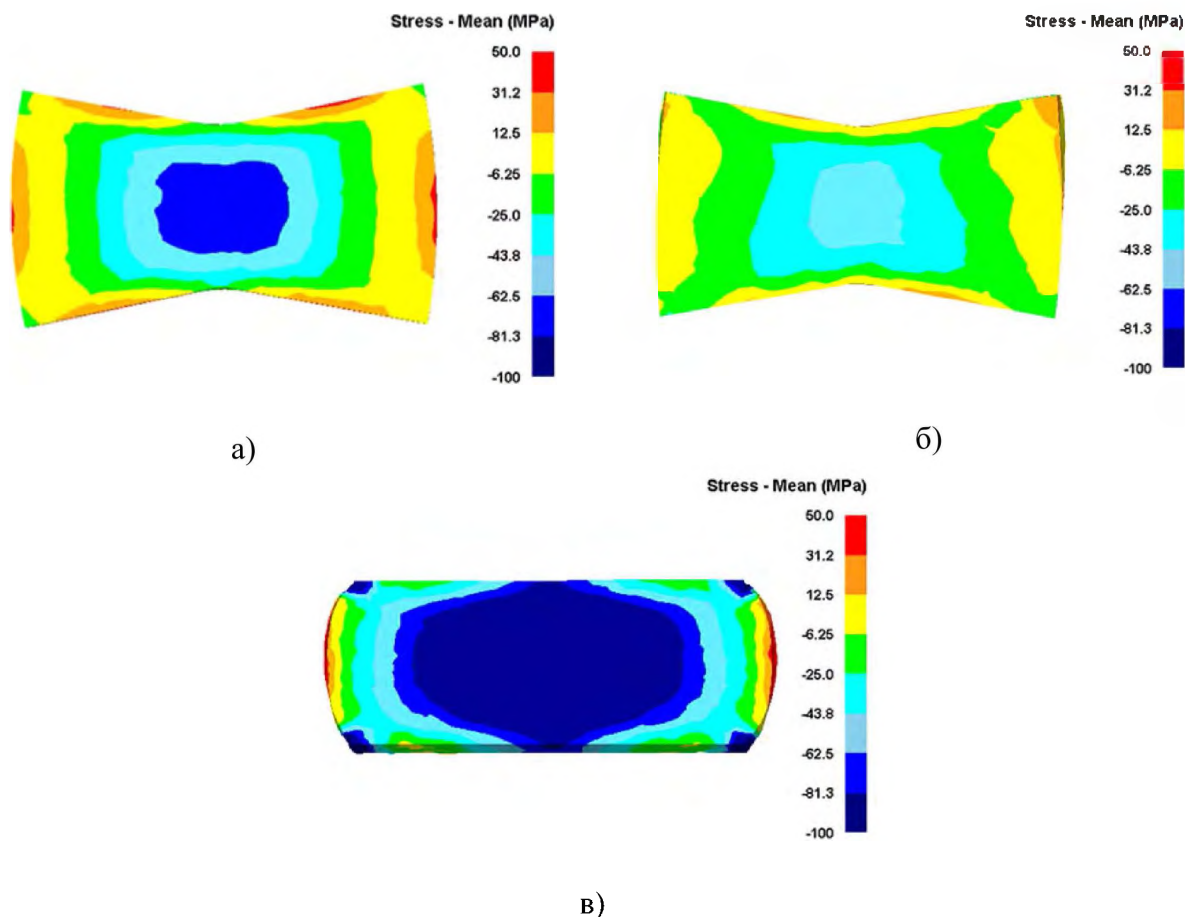
а – клиновые бойки; б – ступенчато-клиновые бойки;  
 в – плоские ступенчатые бойки  
 Рис. 5. Эквивалентная деформация

Эквивалентная деформация показывает интенсивность проработки заготовки по всему ее сечению. Из рисунка 5 видно, что наибольший уровень эквивалентной деформации реализуется в плоских ступенчатых бойках, поскольку распределение контактной поверхности по ширине заготовки является равномерным. В бойках, имеющих клин, наибольшая величина эквивалентной деформации реализуется в зоне влияния клина – осевой. По мере удаления от осевой зоны уровень эквивалентной деформации снижается.



а – клиновые бойки; б – ступенчато-клиновые бойки;  
в – плоские ступенчатые бойки  
Рис. 6. Эквивалентное напряжение

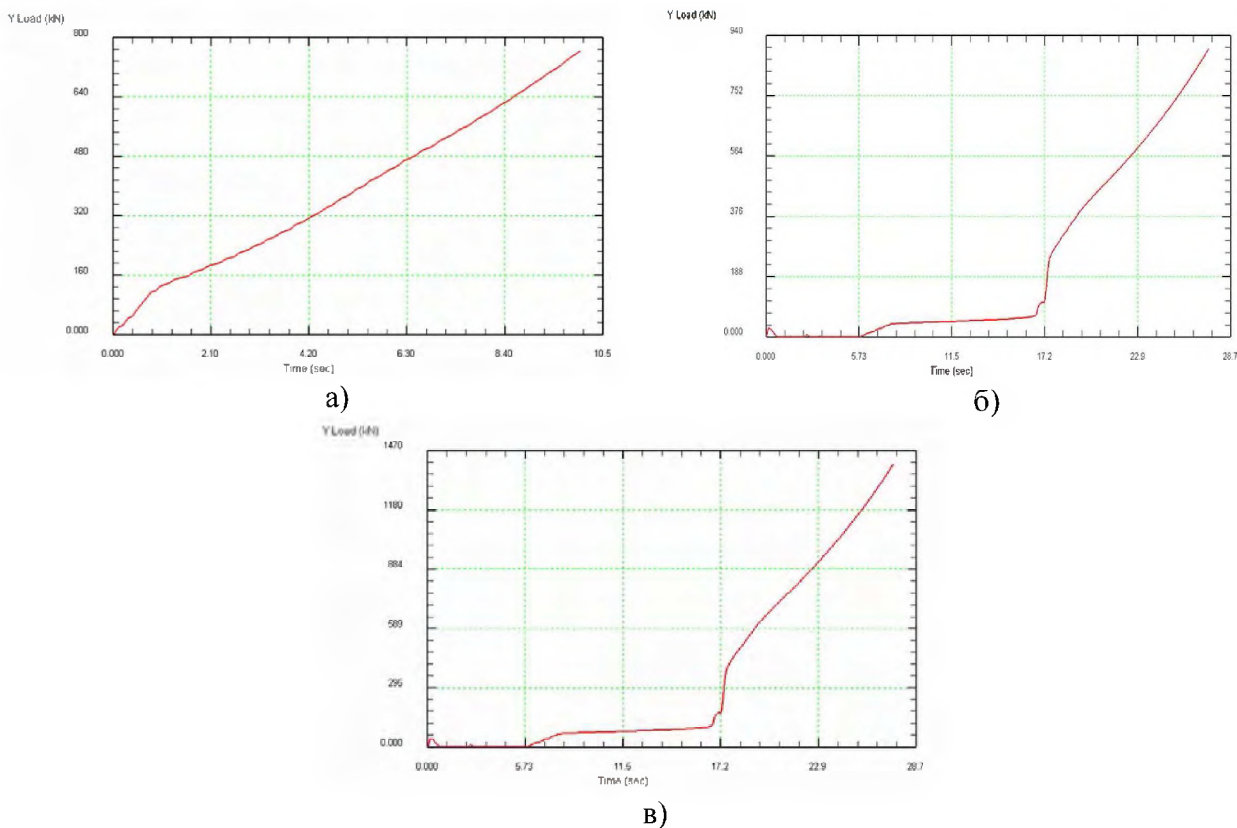
Эквивалентное напряжение является обобщенным результатом действия трех главных напряжений. Являясь подкоренным выражением, всегда принимает положительное значение и позволяет оценить общий уровень напряжения в данной точке. При рассмотрении всех трех моделей было выявлено, что наиболее оптимальная картина распределения эквивалентного напряжения реализуется в ступенчато-клиновых бойках, поскольку при деформировании в них возникающее эквивалентное напряжение имеет наиболее равномерное распределение по всему сечению, что является совмещенным действием наклонного ступенчатого канала и поперечного клина. В отличие от данной модели в клиновых бойках характер распределения эквивалентного напряжения менее равномерен из-за отсутствия ступенчатой зоны интенсификация напряжений значительно меньше, основное сосредоточение в осевой зоне; на боковых участках действие напряжений незначительно. В плоских ступенчатых бойках за счет обширной контактной поверхности интенсификация эквивалентных напряжений достигает максимума, в поперечном сечении отсутствуют зоны без напряжения. Однако здесь наблюдается крайняя неравномерность распределения напряжений – в приконтактных участках величина напряжений превышает значение осевых более чем в 2 раза, что может привести к анизотропии механических свойств по сечению заготовки.



а – клиновые бойки; б – ступенчато-клиновые бойки;  
в – плоские ступенчатые бойки

Рис. 7. Гидростатическое давление

В отличие от эквивалентного напряжения гидростатическое давление показывает интенсивность сжимающих и растягивающих напряжений по сечению заготовки, т.е. величина напряжения может принимать как положительное, так и отрицательное значение. Анализируя данный параметр можно выявить те зоны, которые подвержены воздействию растягивающих напряжений, т.е. являются наиболее опасными с точки зрения возникновения дефектов. Как и при рассмотрении эквивалентных напряжений, при изучении гидростатического давления установлено, что наиболее оптимальным вариантом являются ступенчато-клиновые бойки, в которых наблюдается наиболее равномерное распределение данного параметра. При этом максимальная величина растягивающих напряжений достигает 6 МПа, что относительно невелико. В клиновых бойках характер распределения гидростатического давления схож со ступенчато-клиновыми бойками, однако здесь имеет место интенсификация растягивающих напряжений за счет одностороннего действия клина без участия наклонной ступенчатой зоны. Максимальная величина растягивающих напряжений достигает 32 МПа. В плоских бойках характер распределения гидростатического давления является самым неравномерным. В центральной части заготовки преобладают сжимающие напряжения, достигающие значения -100 МПа, однако на боковых участках в поверхностных слоях возникают значительные растягивающие напряжения, которые могут привести к образованию трещин. Максимальная величина растягивающих напряжений достигает 50 МПа.



а – клиновые бойки; б – ступенчато-клиновые бойки;  
в – плоские ступенчатые бойки  
Рис. 8. Усилие деформирования

Из графиков усилия деформирования видно, что наибольшее усилие требуется на деформацию заготовки в плоских ступенчатых бойках (~1470 кН). В тоже время значения усилия на деформацию заготовки в клиновых и ступенчато-клиновых бойках значительно меньше. Это связано с тем, что площадь контакта заготовки с инструментом в простых ступенчатых бойках значительно выше, чем в клиновидных бойках. Наименьшее усилие затрачивается на протяжку заготовки в простых клиновидных (~800 кН), так как происходит только операция осадки, а в ступенчатых клиновидных бойках помимо процесса осадки заготовка подвергается сдвиговым деформациям на втором участке (~940 кН).

Также в ступенчато-клиновых бойках было сделано два продольных сечения: на расстоянии 25% и 50% от ширины заготовки (рис. 9а, б).

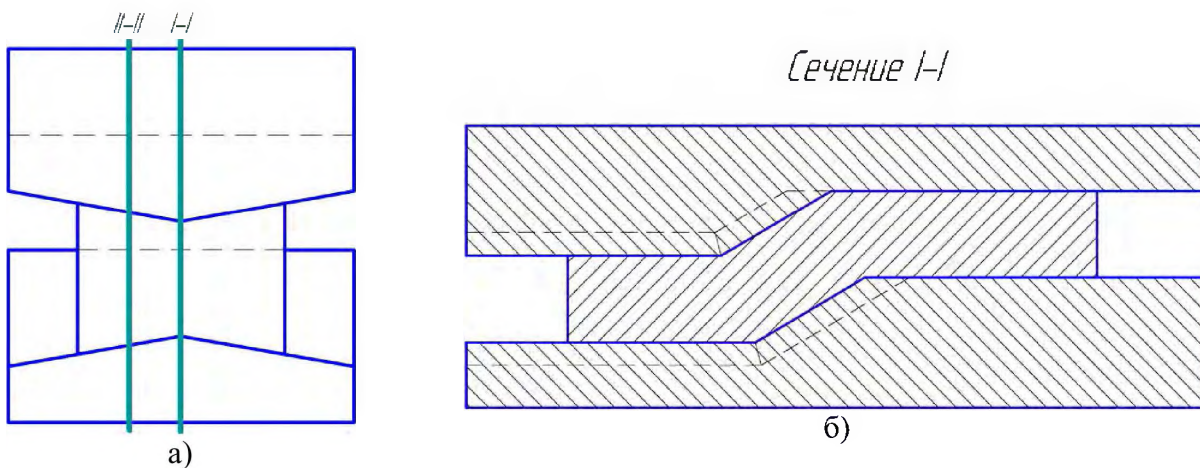
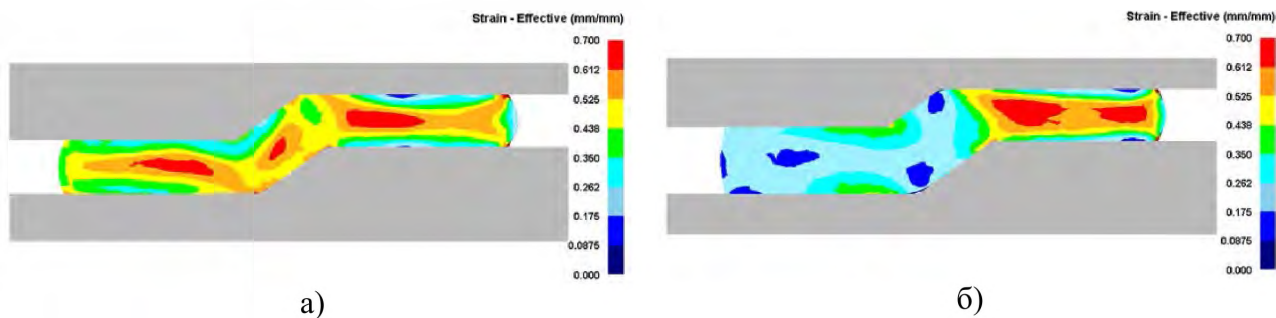
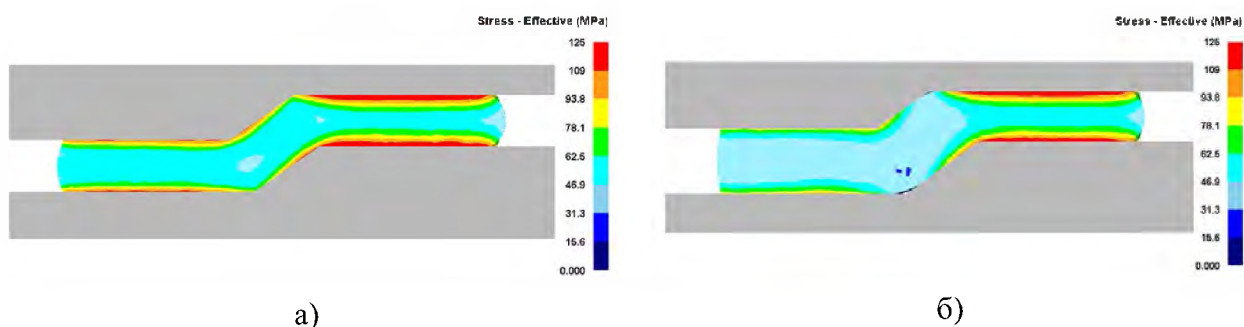


Рис. 9. Схемы расположения сечений для расположения НДС

Это было сделано для того, чтобы изучить основные параметры НДС (эквивалентные деформации и напряжения) в продольном направлении, поскольку на каждом из трех участков ступенчато-клиновых бойков реализуются различные схемы деформирования.



а – 50% от ширины; б – 25% от ширины  
Рис. 10. Параметры деформации в продольном направлении



а – 50% от ширины; б – 25% от ширины  
Рис. 11. Параметры напряжения в продольном направлении

Анализируя полученные картины распределения НДС (рис. 10, 11), отчетливо видно, что на третьем (выходном) участке оба параметра распределены равномерно по ширине заготовки в обоих сечениях, что является следствием деформирования заготовки плоскими участками бойков. На первом (входном) участке распределение обоих параметров аналогично распределению в клиновых бойках. На центральном (наклонном) участке напряжения сконцентрированы в осевой зоне заготовки, на расстоянии 25% от ширины его значение снижается в полтора раза. Распределение эквивалентной деформации аналогично напряжению – максимальные значения возникают в осевой зоне, по мере удаления от центра их интенсивность снижается. Также в осевой зоне отчетливо видно повышенные величины деформации при переходе с входного участка на наклонный, что обусловлено дополнительным влиянием наклонной ступени наряду с клином.

## Выводы

Было проведено компьютерное моделирование процесса деформирования заготовки в новой конструкции кузнечных бойков, сочетающих в себе элементы известных клиновых и ступенчатых бойков. Сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния и возникающего усилия показал, что новая конструкция ступенчато-клиновых бойков является наиболее оптимальным вариантом для реализации процесса протяжки прямоугольных заготовок. При их использовании реализуется оптимальная и равномерная картина распределения напряженного состояния, в достаточной мере реализуется деформационная проработка, особенно в осевой зоне, а также значительно меньшее усилие деформирования в сравнении с плоскими ступенчатыми бойками. Таким образом использование ступенчато-клиповых бойков в ходе деформирования позволит получать заготовки с качественной проработкой структуры по всему сечению при незначительных энергозатратах.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Патент СССР №1409394. Способ изготовления поковок и инструмент для его осуществления/ В.К. Воронцов, А.В. Котелкин, А.Б. Найзабеков и др.1984.
2. Марков О.Е. Исследование технологического процессаковки крупных поковок клиновыми бойками// Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2012.-№12-С.24-27.
3. Исследование процессовковки укороченных слитков выпуклыми клиновыми оппозитными бойками/ Марков О.Е.// Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении: Сборник научных трудов. - Луганск, 2012. – С.32-39.