

МКЭ моделирование асимметричной прокатки заготовок, имеющих разброс свойств по высоте*

Панин Е.А.

НАО «Карагандинский индустриальный университет»
г. Темиртау, Казахстан
Cooper802@mail.ru

Лежнев С.Н.

НАО «Рудненский индустриальный университет»
г. Рудный, Казахстан
Sergey_legnev@mail.ru

Куис Д.В.

Белорусский государственный технологический университет
г. Минск, Беларусь
dmitrykuis@mail.ru

Аннотация. Данная работа посвящена компьютерному моделированию и исследованию процесса асимметричной прокатки заготовок, имеющих градиентный разброс механических свойств по толщине, который был обеспечен путем введения дисперсных частиц в кристаллизующийся расплав при центробежном литье. Изучение процесса асимметричной прокатки осуществлялось в сравнении с симметричной прокаткой. В качестве исходных данных для получения модели исходной заготовки с градиентным разбросом механических свойств по толщине, соответствующей реальной заготовке, получаемой путем введения дисперсных частиц в кристаллизующийся расплав при центробежном литье, были использованы, как экспериментальные результаты измерения твердости по Виккерсу, так и результаты моделирования данного испытания на твердость. Результаты компьютерного моделирования показали, что при реализации асимметричной прокатки с небольшим коэффициентом асимметрии (менее 3) общий характер проработки металла с градиентным распределением свойств мало отличается от симметричной схемы. Коэффициент асимметрии выше же 3, оказывать существенное влияние на неравномерность проработки заготовки по толщине. При этом при повышении общего уровня накопленной деформации возможно, как увеличить уровень градиентности свойств по толщине деформируемой заготовки, так и снизить его, приведя распределение свойств по толщине к более однородному состоянию.

Ключевые слова: моделирование, метод конечных элементов, сталь, симметричная прокатка, асимметричная прокатка, дисперсно-армированная сталь, градиент, механические свойства.

ВВЕДЕНИЕ

Уже давно доказано, что альтернативным способом повышения механических свойств сталей и сплавов путем введения в состав металла или сплава значительного количества легирующих элементов, является способ инжестирования ультрадисперсных частиц в кристаллизующийся расплав. На данный момент известно несколько перспективных способов инжестирования ультрадисперсных частиц в кристаллизующийся расплав [1-6], позволяющих получать гетерофазные дисперсно-армированные стали с невыраженной границей раздела слоев. Такие стали являются представителями современных материалов, поскольку в технологии их создания реализуется механизм рационального конструирования и обеспечения необходимыми свойствами только тех объемов, которые подвергаются различным.

Если технологии получения дисперсно-армированной стали с невыраженной границей раздела слоев, в какой-то степени уже изучены, как в теоретическом, так и технологическом плане (какая-то технология в большей степени, а какая-то в меньшей), то постановка вопросов и решение задач, связанных с разработкой технологий обработки такой стали давлением, пока находится на начальной стадии. По этой причине на данный момент весьма актуальной задачей является разработка инновационных технологий обработки давлением заготовок из дисперсно-армированной стали с невыраженной границей раздела слоев, так как в некоторых случаях использование просто литой заготовки невозможно.

Для деформационной обработки заготовок из гетерофазные дисперсно-армированные стали с невыраженной границей раздела слоев, которые изначально имеют градиентное распределение свойств по толщине, наиболее эффективным методом на наш взгляд является асимметричная прокатка [7]. Так при обычной симметричной прокатке, когда действие обоих валков на заготовку является одинаковым, после каждого цикла деформирования заготовка будет получать однородную проработку по всему сечению. В результате при повышении общего уровня накопленной деформации величина градиента всех свойств будет сохраняться. При асимметричной же прокатке влияние каждого валка на проработку заготовки будет отличаться в зависимости от коэффициента асимметрии. В результате

Асимметричная прокатка известна достаточно давно. Учеными разных стран, в том числе и авторами данной заявки, изучены различные варианты реализации асимметричной прокатки на практике и ее влияние на качество прокатываемого толстолистового металла [8-16]. Но в большинстве случаев исходные заготовки перед асимметричной прокаткой имели равномерное распределение свойств по толщине металла. Процесс асимметричной прокатки заготовки из дисперсно-армированной стали с невыраженной границей раздела слоев ранее не изучался. Хотя известны варианты асимметричной прокатки биметаллических заготовок, которые также, как и в нашем случае имеют градиент свойств по толщине [17-20], но только с выраженной границей раздела слоев.

Поэтому целью данной работы является моделирование методом конечных элементов (МКЭ) и исследование процесса асимметричной прокатки заготовки, имеющей гради-

* Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № AP23485709). Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", <https://icie-rus.org>

ентный разброс механических свойств по толщине, который был обеспечен путем введения дисперсных частиц в кристаллизующийся расплав при центробежном литье.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Современные программные комплексы конечно-элементного моделирования процессов обработки давлением (DEFORM, QFORM, Simufact Forming, LS Dyna) в последние годы существенно наращивают свой функциональный потенциал. Практически каждый год выходят новые версии данных продуктов, в которых присутствуют новые функции (улучшенные генераторы сеток конечных элементов, новые модели пластичности материалов и т.п.). В результате у конечного потребителя появляется возможность исследовать новые и известные процессы ОМД на качественно новом уровне.

Однако при всех этих преимуществах, во всех указанных программах также имеются и недостатки, которые связаны непосредственно с фундаментальным принципом моделирования. Получаемый результат – это именно модель, а не конечный реальный результат. Невозможно получить модель с нулевым уровнем погрешности, поскольку в условиях физического эксперимента всегда имеются множество факторов, которые просто невозможно учесть при моделировании. Самым большим допущением при моделировании является допуск по материалу – он принимается полностью изотропным и идеальным, без каких-либо внутренних дефектов и неоднородностей. Для подавляющего большинства исследуемых процессов ОМД это вполне приемлемое допущение, поскольку чаще всего исследуется влияние процесса ОМД на уровень проработки заготовки по сечению. В этом случае заготовку предпочтительно использовать однородную, в условиях физического эксперимента для получения таковой обычно используют предварительный отжиг.

Данный принцип совершенно непригоден для исследования заготовок, полученных путем введения в них дисперсных частиц при центробежном литье. Такие заготовки изначально получают с разбросом механических свойств по сечению и при последующем деформировании результаты будут существенно отличаться от деформации однородной заготовки. Поэтому сначала необходимо получить модель исходной заготовки, соответствующую реальным условиям введения дисперсных частиц в кристаллизующийся расплав при центробежном литье. Для этого можно использовать итоговые экспериментальные результаты, как начальные для моделирования.

В качестве исходных данных для моделирования были использованы экспериментальные результаты измерения твердости по Виккерсу (рис. 1а). Испытания проводились на нержавеющей стали 08X18H10T при нагрузке 0,5 кгс с выдержкой 15 с. Как видно из графика распределения твердости на рисунке 1б, по толщине заготовки отчетливо видны три зоны – во внешней зоне твердость минимальная, промежуточная зона является наиболее протяженной (50-60% всей толщины), здесь уровень твердости выше примерно на 30%, чем во внешнем слое. Последняя зона (внутренний слой) имеет наивысшую твердость, превышающую на 58% аналогичную во внешнем слое.

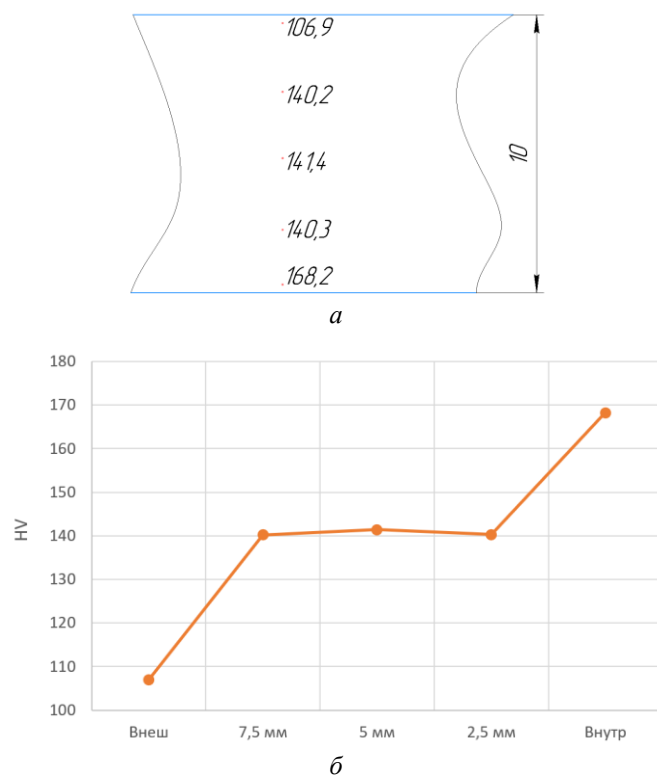


Рис. 1. Схема распределения твердости по Виккерсу по толщине заготовки (а) и график твердости (б)

Для получения такого распределения свойств заготовка должна быть подвергнута неравномерной деформации. Однако также имеется проблема сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными. В используемом программном обеспечении DEFORM имеется встроенный анализатор твердости, работающий по С-шкале Роквелла (HRC). Однако в нашем случае он является непригодным, поскольку в переводной шкале отсутствуют значения в соответствующем диапазоне обеих шкал (рис. 2).

Поэтому единственно корректным вариантом в данном случае будет моделирование испытания на твердость по Виккерсу с измерением диагонали отпечатка пирамидки. Для создания схемы неравномерной деформации было решено использовать процесс осадки с наложением определенных граничных условий:

- свободное течение металла происходило лишь в одном направлении;
- контактные условия на горизонтальных поверхностях были различными – на одной поверхности коэффициент трения был низким (0,15, что соответствует шлифованной поверхности со смазкой), на другой поверхности коэффициент трения был высоким (1, что соответствует закругленной текстурированной поверхности).

Данные условия могут быть реализованы на практике при осадке заготовке в П-образной оснастке (рис. 3), при этом нижняя плита должна иметь текстурированную поверхность для создания высокого уровня сцепления с заготовкой.

Следующей задачей является определение уровня осадки для достижения требуемого уровня проработки металла. Здесь ключевым параметром будет являться значе-

ние эквивалентной деформации, которое для заданного материала будет приводить к конкретному уровню упрочнения. Поскольку аналитически это просчитать крайне сложно, было решено построить несколько моделей – в каждой из них заготовка разной толщины от 11 до 20 мм осаживалась до 10 мм.

Диаметр отпечатка, d, мм	По Бриггелю, HB	По Роквеллу			По Виккерсу, HV
		HRC	HRA	HRB	
3,55	293	31	66		291
3,60	286	30	66		285
3,65	277	29	65		278
3,70	269	28	65		272
3,75	262	27	64		261
3,80	255	26	64		255
3,85	248	25	63		250
3,90	241	24	63	100	240
3,95	235	23	62	99	235
4,00	229			98	226
4,05	223			97	221
4,10	217			97	217
4,15	212			96	213
4,20	207			95	209
4,25	201			94	201
4,30	197			93	197
4,35	192			92	190
4,40	187			91	186
4,45	183			89	183
4,50				88	177
4,55				87	174
4,60				86	170
4,65				85	166
4,70				84	163
4,75				83	159
4,80				82	156
4,85				81	153
4,90				80	149
4,95				79	146
5,00				78	143

Рис. 2. Переводная шкала значений твердости

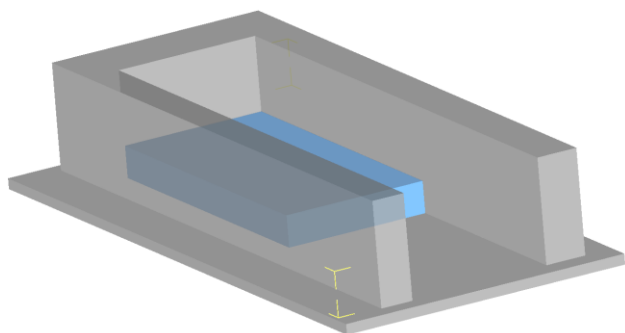


Рис. 3. Модель осадки в П-образной оснастке для создания неравномерного течения металла

Последней задачей ставилось определение наиболее оптимальной модели не только по значениям твердости, но и по ее распределению по толщине заготовки. Для этого необходимо ввести в базу материала исходное значение твердости, которое будет соответствовать начальному (недеформированному) состоянию. По умолчанию марка стали AISI 304 (аналог стали 08X18H10T) имеет твердость 129 HV, что ниже полученного значения во внешнем слое. Это может быть следствием возникновения определенного уровня пористости при литье. В этом случае целесообразно установить значение твердости 106,9 HV как исходное.

После последовательного анализа полученных моделей осадки было выявлено, наиболее подходящие результаты получаются при осадке заготовок толщиной 14-15 мм. Заготовка по толщине получает неравномерную проработку (рис. 4). Здесь показаны 2 картины распределения деформации – глобальная и локальная в диапазоне 0-3 для того, чтобы оценить уровень деформации на верхнем слое.

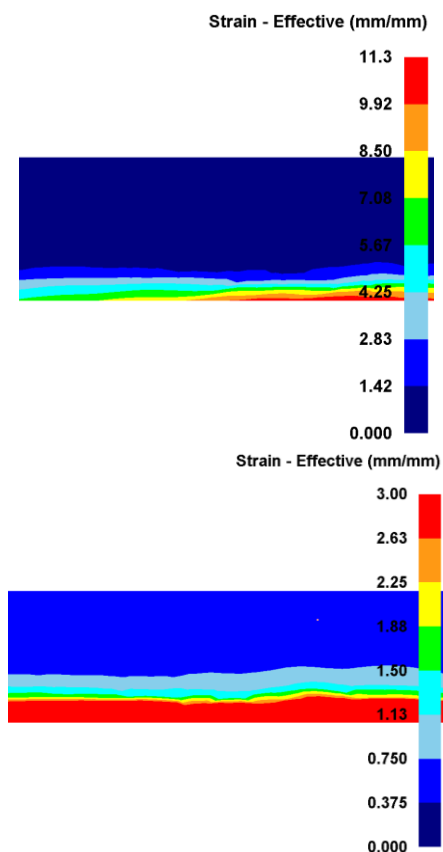


Рис. 4. Деформация при осадке заготовки толщиной 15 мм

При моделировании испытания на твердость пирамидке было задано усилие 4,903 Н, что соответствует нагрузке 0,5 кгс. В результате было зафиксировано внедрение пирамидки в заготовку с получением диагонали длиной 0,0937 мм. Согласно ГОСТ Р ИСО 6507-4-2009 «Металлы и сплавы. Измерения твердости по Виккерсу. Часть 4. Таблицы определения твердости», данное значение диагонали соответствует величине твердости примерно 105,5 HV. Результаты измерения твердости представлены в табл. 1. На рис. 5 представлены сводные значения твердости, полученные в ходе эксперимента и при моделировании. Сравнение этих значений позволяет судить о достаточно высокой схожести полученных результатов. Следовательно, полученная модель заготовки адекватно описывает механическое состояние стали 08X18H10T после центробежного литья.

Таблица 1

Результаты измерения твердости

Место измерения	Диагональ отпечатка, мм	Твердость HV
Внешний слой	0,0937	105,5
7,5 мм	0,0835	133
5 мм	0,0831	135
2,5 мм	0,0798	146
Внутренний слой	0,0726	176

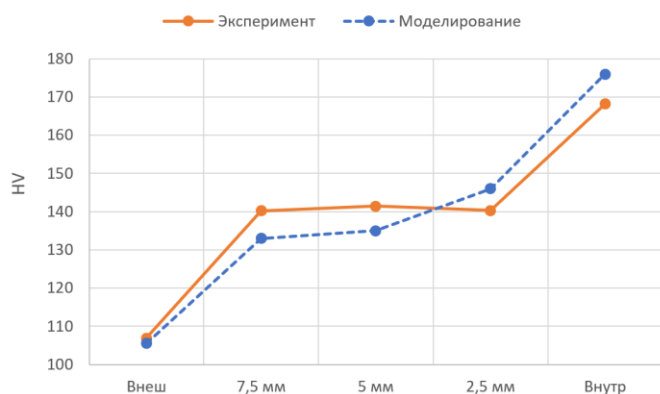


Рис. 5. Сравнительный график значений твердости

Для оценки влияния начального разброса свойств на последующее состояние металла при деформировании было решено вести моделирование в трех направлениях:

- 1) симметричная прокатка в гладких валках;
- 2) асимметричная прокатка в гладких валках (эффект асимметрии на внешнем слое);
- 3) асимметричная прокатка в гладких валках (эффект асимметрии на внутреннем слое).

При этом процесс асимметричной прокатки был рассмотрен в двух вариантах: кинематической и геометрической с одинаковым уровнем асимметрии. Данные модели позволяют оценить проработку заготовки по сечению при различных условиях нагружения.

Поскольку прокатка ведется в гладких валках с небольшим обжатием, то моделирование можно вести в 2D режиме. Диаметр валков составляет 200 мм. Заготовка представляет собой лист прямоугольной формы толщиной 10 мм и длиной 100 мм. В качестве материала для заготовки была выбрана сталь AISI 304 (аналог стали 08X18H10T), которая была использована ранее при создании исходной заготовки. При компьютерном моделировании процесса использовались следующие технологические параметры:

- материал заготовки был анизотропным, разброс свойств был получен на предыдущем этапе;
- прокатка проводилась при температуре окружающей среды 20 °С;
- температура нагрева заготовки перед прокаткой была равна 900 °С и 1100 °С;
- коэффициент теплообмена заготовки с инструментом составлял 5000 Вт/(м²·°С);
- коэффициент теплообмена заготовки с окружающей средой составлял 0,002 Вт/(м²·°С);
- коэффициент трения на контакте металла с валками был принят 0,4 (что соответствует поверхности с высоким уровнем шероховатости);
- скорость вращения валков при симметричной прокатке была равна 60 об/мин; при кинематической асимметричной прокатке скорости вращения валков были равны 60 и 90 об/мин (коэффициент асимметрии 1,5);
- модель геометрической асимметрии достигалась разницей диаметров валков (200 мм и 300 мм), скорость вращения при этом была равна 60 об/мин на обоих валках.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 6 представлены результаты формоизменения заготовки во всех рассмотренных моделях.

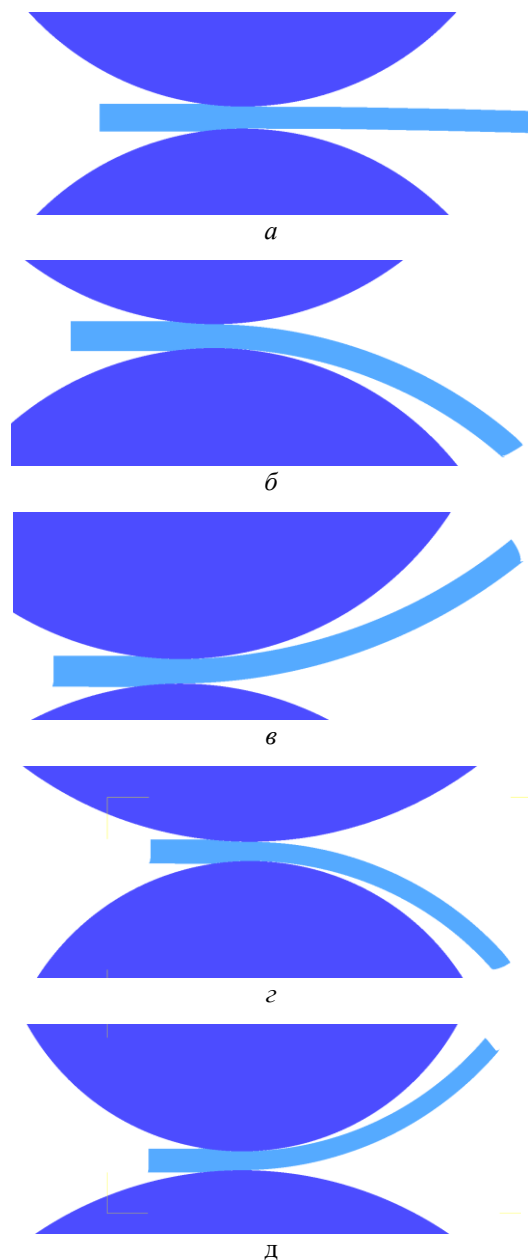


Рис. 6. Формоизменение заготовки:

а – симметричная прокатка; *б* – кинематическая асимметричная прокатка с эффектом асимметрии на верхнем внешнем слое (90/60); *в* – кинематическая асимметричная прокатка с эффектом асимметрии на нижнем внутреннем слое (60/90); *г* – геометрическая асимметричная прокатка с эффектом асимметрии на верхнем внешнем слое (300/200); *д* – геометрическая асимметричная прокатка с эффектом асимметрии на нижнем внутреннем слое (200/300)

В целом, формоизменение заготовки полностью соответствует принципу асимметричной прокатки – на более быстром валке создаются более высокие значения линейной скорости на контакте с заготовкой. В результате эти слои существенно опережают слои на контакте с другим валком, что приводит к изгибу заготовки в противоположном направлении. При этом было отмечено схожее формоизменение при различных видах асимметричной прокатки. Однако на практике наиболее эффективной схемой является кинематическая асимметрия, для создания которой достаточно использовать индивидуальный привод валков с

применением частотного преобразователя. Это позволит изменять уровень асимметрии в любом диапазоне. При геометрической асимметрии ее уровень ограничивается максимальным диаметром валков, которые могут быть установлены в соответствующую станину. В результате зачастую максимальный уровень асимметрии не может быть выше 2. Поэтому в дальнейшем было решено рассматривать только кинематическую асимметрию.

Для более глубокого анализа необходимо рассмотреть основные параметры напряженно-деформированного состояния, а также усилие деформирования. При оценке напряженного состояния наиболее эффективным параметром является среднее гидростатическое давление, а при оценке деформированного состояния эквивалентная деформация.

На первом этапе компьютерного моделирования рассмотрим модели симметричной прокатки при разных температурах, которые дадут оценку общей проработки заготовки по высоте. На рис. 7 представлены картины среднего гидростатического давления в очаге деформации прокатных валков.

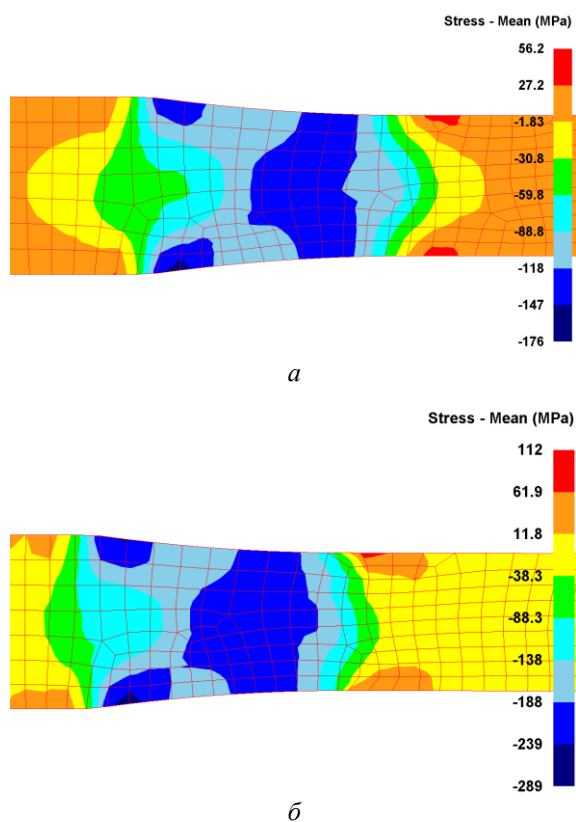


Рис. 7. Среднее гидростатическое давление в очаге деформации прокатных валков: а – 1100 °С; б – 900 °С

По распределению напряжений оба очага имеют идентичный вид, однако снижение температуры нагрева на 200 градусов приводит к росту сжимающих напряжений более чем в 1,5 раза. Значения растягивающих напряжений также повышаются почти вдвое, однако их уровень и зона охвата существенно ниже уровня сжимающих напряжений. Распределение зон напряжений по высоте в обоих случаях является симметричным.

Рассматривать подобным образом эквивалентную деформацию будет неэффективно, поскольку заготовка изначально имеет слишком большой разброс значений. Поэтому здесь был применен принцип отслеживания параметра в определенных точках (рис. 8, а). Точка 1 соответствует упрочненному внутреннему слою, точка 2 соответствует центральному слою, точка 3 соответствует наименее твердому внешнему слою. Результаты измерений для модели с температурой заготовки 1100 °С представлены на графике на рис. 8, б.

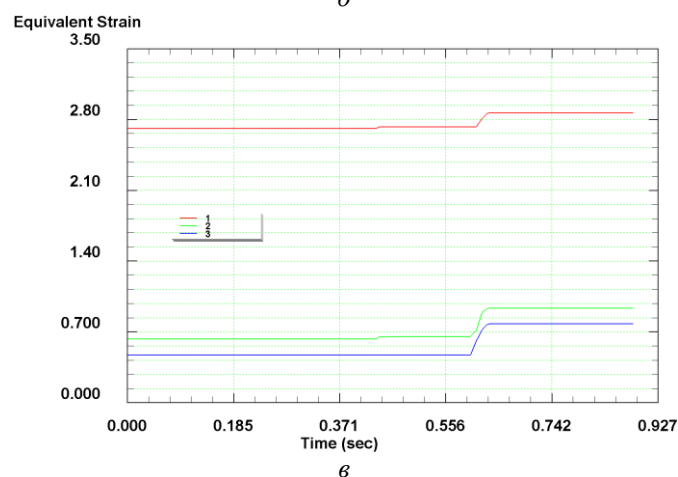
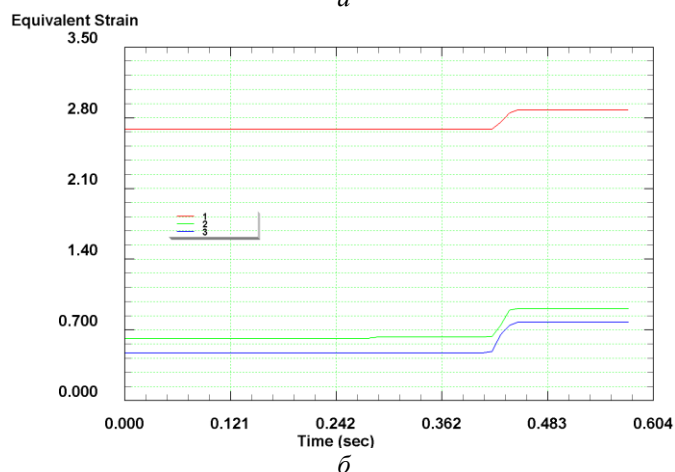
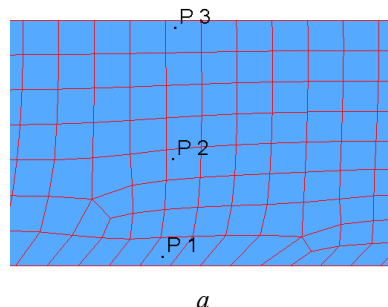


Рис. 8. Эквивалентная деформация: а – заданные точки по высоте заготовки; б – график изменения деформации при 1100 °С; в – график изменения деформации при 900 °С

Из графика видно, что по всей высоте заготовка после прокатки получает прирост деформации примерно на 15%. С изменением температуры до 900 °С (рис. 8, в), каких-либо отличий в характере роста и значениях деформации

по всем указанным точкам не наблюдается. При анализе возникающих усилий прокатки было выявлено, что снижение температуры нагрева приводит к существенному росту усилия. Так, начальное усилие 3,08 кН для модели с температурой заготовки 1100 °С при снижении температуры до 900 °С выросло до 5,08 кН.

Такое низкое значение усилий является результатом моделирования в плоском (2D) состоянии, где ширина заготовки равна 1 мм. Для получения точного значения усилия данные значения необходимо умножить на реальную ширину. При этом необходимо отметить идентичное распределение усилия на валках в этих моделях, что говорит о малом влиянии начального градиента свойств при симметричном деформировании.

На втором этапе компьютерного моделирования одновременно рассмотрели 4 модели асимметричной прокатки, что позволило оценить одновременное влияние фактора асимметрии и температуры. На рис. 9 картины среднего гидростатического давления в очаге деформации прокатных валков при асимметричной прокатке.

Здесь необходимо отметить два ключевых момента:

1) при снижении температуры в обоих случаях, как и при симметричной прокатке характер распределения напряжений остается постоянным;

2) введение фактора асимметрии нарушает симметричность очага деформации, приводя к росту сжимающих напряжений на контакте с более быстрым валком. На противоположном валке уровень напряжений снижается. При этом несимметричное распределение напряжений является зеркальным отражением при смене направления асимметрии.

Для оценки деформированного состояния по аналогии с симметричной прокаткой было изучено изменение эквивалентной деформации в трех точках. Максимальные значения деформации сведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения эквивалентной деформации

Точка	Симм 1100°С	Симм 900°С	60/90 1100°С	60/90 900°С	90/60 1100°С	90/60 900°С
1	2,87	2,87	2,95	2,9	3,08	3,06
2	0,805	0,805	0,805	0,805	0,98	0,96
3	0,77	0,77	0,77	0,77	0,84	0,84

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод о незначительном влиянии асимметричной схемы при деформировании градиентной заготовки. Наиболее заметные изменения зафиксированы в точке 1 (твердый внутренний слой), при этом в точках 2 и 3 серьезных изменений не выявлено. Однако здесь необходимо принимать во внимание использование сравнительно небольшого уровня асимметрии (1,5). В ряде работ по асимметричной прокатке приводятся результаты более существенного воздействия схемы АП на проработку металла. Поэтому целесообразно на наиболее отличающейся схеме (90/60 при 1100°С) провести дополнительное исследование по влиянию более высоких уровней АП. Значения усилий при асимметричном деформировании представлены в табл. 3.

Таблица 3

Средние значения усилий, Н

Симм 1100°С	Симм 900°С	60/90 1100°С	60/90 900°С	90/60 1100°С	90/60 900°С
3080	5080	3020	5420	3050	5300

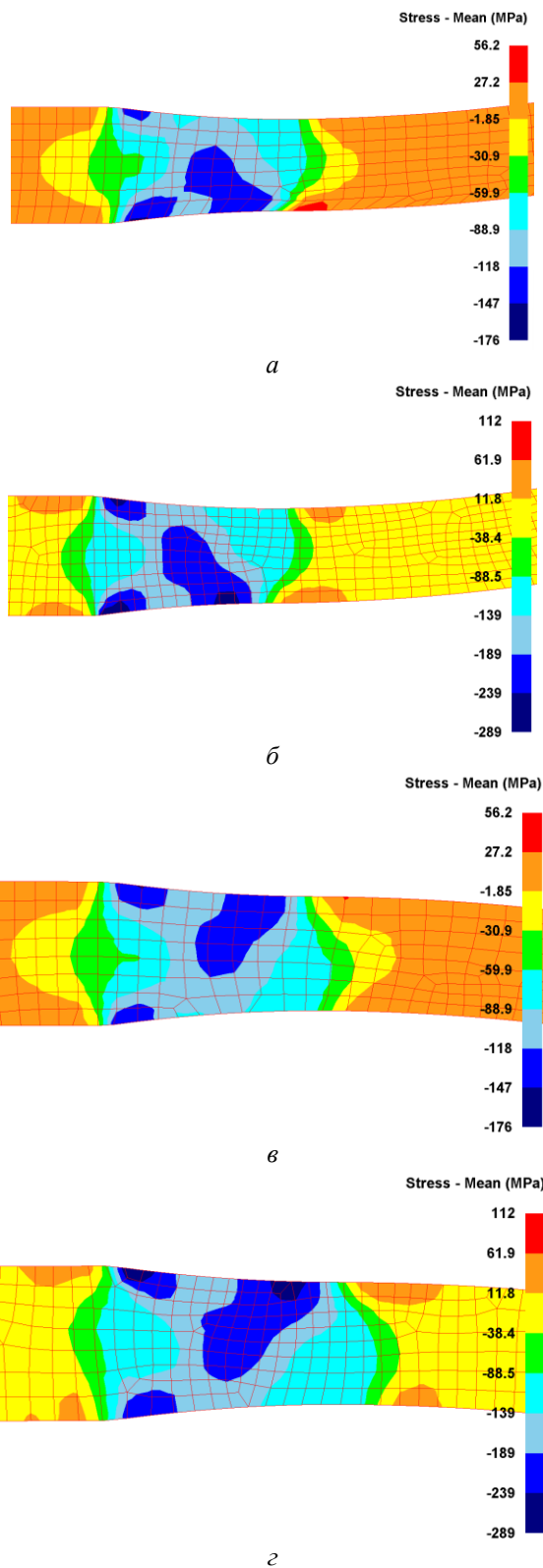


Рис. 9. Среднее гидростатическое давление при асимметричной прокатке:

а – модель 60/90 при 1100 °С; б – модель 60/90 при 900 °С; в – модель 90/60 при 1100 °С; г - модель 90/60 при 900 °С

Анализируя полученные данные, можно подтвердить ранее сделанный вывод о незначительном влиянии асимметричной схемы при деформировании градиентной заготовки. Во всех рассмотренных случаях асимметричной

прокатки значения усилий несущественно отличаются от вариантов симметричной прокатки. Самые заметные отличия наблюдаются в моделях с пониженной температурой, что является следствием роста сжимающих напряжений в очаге деформации валков.

Последним этапом исследований было изучение влияния повышенного уровня асимметрии на проработку металла.

На рис. 10 представлены результаты для точки 1 (твердый внутренний слой), из которых видно, что с дальнейшим повышением фактора асимметрии уровень проработки начинает расти. Так, при уровне асимметрии 3 максимальный уровень эквивалентной деформации равен 3,22, а при уровне асимметрии 6 максимальный уровень эквивалентной деформации равен 3,48.

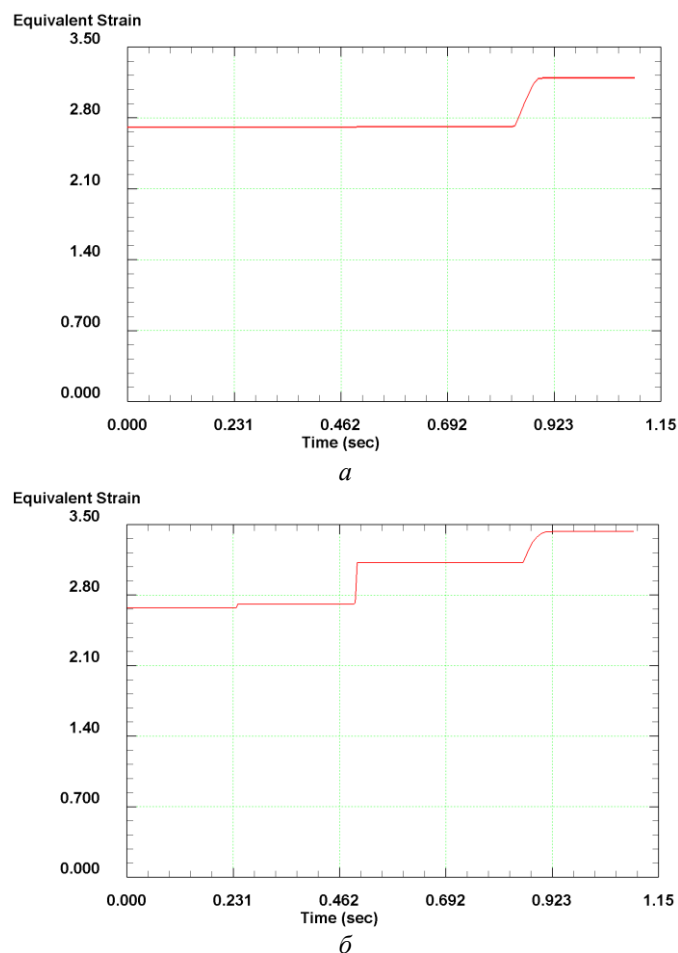


Рис. 10. Эквивалентная деформация при повышенном уровне асимметрии в модели при 1100 °С: а – модель 180/60 (фактор асимметрии 3); б – модель 180/30 (фактор асимметрии 6)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

Представленные в данной работе результаты конечно-элементного моделирования прокатки заготовки с градиентным распределением механических свойств по ее толщине показали, что при реализации асимметричной прокатки с небольшим коэффициентом асимметрии общий характер проработки металла с градиентным распределением свойств мало отличается от симметричной схемы. Однако,

при росте коэффициента асимметрии выше 3, данный фактор начинает оказывать существенное влияние на неравномерность проработки. Поэтому, для контроля проработки литого металла с градиентным распределением механических свойств по толщине заготовки рекомендуется использовать асимметричную прокатку с высоким уровнем асимметрии. При этом при повышении общего уровня накопленной деформации возможно, как увеличить уровень градиентности свойств по толщине продеформируемой заготовки, так и снизить его, приведя распределение свойств по толщине к более однородному состоянию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гузенков С.А. Повышение конструкционной прочности литой стали модифицированием дисперсными порошками / С.А. Гузенков, Д.Н. Федоров, Д.В. Руцкий, С.Б. Гаманюк // *Сталь*. – 2010. – №3. – С. 101-103.
2. Жеребцов С.Н. Электрошлаковое литье деталей из стали 08X18H10T / С.Н. Жеребцов, В.И. Гурдин // *Технология машиностроения*. – 2005. – №7. – С. 10-11.
3. Протопопов Е.В. Перспективные технологии модифицирования металла нанопорошковыми инокуляторами / Е.В. Протопопов, В.П. Комшуков, Л.А. Ганзер, Д.Б. Фойг // *Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия»*. – 2011. – № 6. – С. 39-44
4. Патент РФ №2080206. Способ непрерывного литья заготовок / И.В. Чуманов, Д.А. Пятыгин, Е.Е. Тельянова, А.Н. Анисеев. – 2007.
5. Чуманов И.В. Влияние дисперсных частиц карбида вольфрама на микроструктуру стали 12X18H10T, полученной центробежным литьем / И.В. Чуманов, А.Н. Анисеев, Д.А. Жеребцов // *Черные металлы*. – 2020. – №12. – С. 68-73.
6. Чуманов И.В. Повышение износостойкости стали путём ввода карбида титана при кристаллизации слитка / И.В. Чуманов, В.И. Чуманов, Д.А. Пятыгин, Е.Е. Тельянова // *Электрометаллургия*. – 2008. – №2. – С. 32-35.
7. Ji Y.H. Development of severe plastic deformation by various asymmetric rolling processes / Y.H. Ji, J.J. Park // *Materials Science and Engineering A*. – 2009. – vol. 499. iss. 1-2. – P. 14-17.
8. Песин А.М. Асимметричная прокатка листов и лент: история и перспективы развития / М. Песин, Д.О. Пустовойтов, О.Д. Бирюкова, А.Е. Кожемякина // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия*. – 2020. – Т.20, №3. – С. 81-96.
9. Guo B. Mechanistic insight into suppression of size effect in pure titanium foils fabricated via asymmetric rolling / B. Guo, H. Gao, Z. Li, D. Pustovoytov, A. Pesin, C. Kong, H. Yu // *Materials Science and Engineering: A*. – 2026. – vol. 953. – 149692.
10. He D. Effects of velocity ratios and strain paths on the microstructures and mechanical properties of Al-Li alloy during asymmetric rolling / D. He, L. Jiang, J. Long, Y.C. Lin. // *Archives of Civil Mechanical Engineering*. 2026. Vol. 26.
11. Chang L.L. Microstructure and mechanical properties of AM31 magnesium alloys processed by differential speed rolling / L.L. Chang, J.H. Cho, S.B. Kang // *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, Vol. 211, Iss. 9, P. 1527-1533.

12. Kim W.J. Microstructure and mechanical properties of Mg–Al–Zn alloy sheets severely deformed by asymmetrical rolling / W.J. Kim, J.B. Lee, W.Y. Kim, H.T. Jeong, H.G. Jeong // Scripta Materialia. – 2007. – vol. 56, iss. 4. – P. 309-312.

13. Pesin A. Influence of Process Parameters on Distribution of Shear Strain through Sheet Thickness in Asymmetric Rolling / A. Pesin, D.O. Pustovoytov // Key Engineering Materials. – 2014. – vol. 622-623. – P. 929-935.

14. Bochkarev A. Stabilization of roll speed mismatch in controlled asymmetric rolling / A. Bochkarev, G. Kornilov, A. Pesin, D. Pustovoytov, G. Raab, I. Pesin, L. Nosov, A. Baryshnikova // Journal of Physics: Conference Series. 2025. 3127. 012008.

15. Kim W.J. Exceptionally high strength in Mg–3Al–1Zn alloy processed by high-ratio differential speed rolling / W.J. Kim, Y.G. Lee, M.J. Lee, J.Y. Wang, Y.B. Park // Scripta Materialia. – 2011. – vol. 65, iss. 12. – P. 1105-1108.

16. Чигиринский В.В. Влияние холодной прокатки в условиях асимметричного взаимодействия на выкатываемость поверхностных дефектов / В.В. Чигиринский, С.Н. Лежнев, Е.А. Панин, А.Б. Найзабеков, А.О. Толкушкин,

С.Л. Кузьмин, Н.Ш. Дошимов // Материалы международного симпозиума «Перспективные материалы и технологии». – 2025. – С. 18-19.

17. Rydz D. The effect of the asymmetrical rolling process on structural changes in hot-rolled bimetal sheets / D. Rydz, B. Koczurkiewicz, G. Stradomski, T. Garstka, J. Wypart // Archives of Metallurgy and Materials. – 2019. – vol. 64, iss. 4. – P. 1495-1501.

18. Sun J.N. Analysis of longitude profiled rolling process of Cu/Al clad sheet and evaluation of outlet warpage / J.N. Sun, C. Chen, S. Wang, G.N. Liu, H.G. Huang // Journal of Iron and Steel Research International. – 2022. – vol. 29, iss. 6. – P. 973-982.

19. Vini M.H. Investigation of bonding properties of Al/Cu bimetallic laminates fabricated by the asymmetric roll bonding techniques / M.H. Vini, S. Daneshmand // Advances in Computational Design. – 2019. – vol. 4, iss. 1. – P. 33-41.

20. Pesin A.M. The effect of speed asymmetry on the strain state in aluminium bimetals during accumulative rolling / A.M. Pesin, D.O. Pustovoytov, O.D. Biryukova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – vol. 447, iss. 1. – 012066.

DOI: 10.24892/RIJIE/20260111

FEM Modeling of the Asymmetric Rolling of Workpieces with a Range of Properties in Height

Panin E.A.

NPJSC «Karaganda Industrial University»,
Temirtau, Kazakhstan
Cooper802@mail.ru

Lezhnev S.N.

NPJSC «Rudny Industrial University»,
Rudny, Kazakhstan
Sergey_legnev@mail.ru

Kuis D.V.

Belarusian State Technological University,
Minsk, Belarus
dmitrykuis@mail.ru

Abstract. This work is devoted to computer modeling and investigation of the process of asymmetric rolling of workpieces with a gradient spread of mechanical properties in thickness, which was achieved by introducing dispersed particles into a crystallizing melt during centrifugal casting. The process of asymmetric rolling was studied in comparison with symmetrical rolling. As initial data for obtaining a model of the initial billet with a gradient spread of mechanical properties in thickness corresponding to the real billet obtained by introducing dispersed particles into a crystallizing melt during centrifugal casting, both experimental results of Vickers hardness measurement and the results of modeling this hardness test were used. The results of computer modeling have shown that when implementing asymmetric rolling with a small coefficient

of asymmetry (less than 3), the general nature of metal processing with a gradient distribution of properties differs little from the symmetrical scheme. The coefficient of asymmetry is higher than 3, which has a significant effect on the unevenness of the workpiece in thickness. At the same time, with an increase in the overall level of accumulated deformation, it is possible both to increase the level of gradient of properties along the thickness of the deformable workpiece and to reduce it, bringing the distribution of properties along the thickness to a more homogeneous state.

Keywords: modeling, finite element method, steel, symmetric rolling, asymmetric rolling, dispersion-reinforced steel, gradient, mechanical properties.

Библиографическое описание статьи

Панин Е.А. МКЭ моделирование асимметричной прокатки заготовок, имеющих разброс свойств по высоте / Е.А. Панин, С.Н. Лежнев, Д.В. Куис // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2026. – Т.13, №1. – С. 65-72. DOI: 10.24892/RIJIE/20260111

Reference to article

Panin E.A., Lezhnev S.N., Kuis D.V. FEM modeling of the asymmetric rolling of workpieces with a range of properties in height, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2026, vol.13, no.1, pp. 65-72. DOI: 10.24892/RIJIE/20260111