

Обработка металлов давлением. Технологии и машины обработки давлением

УДК 621.721

DOI: 10.14529/met200309

АСИММЕТРИЧНАЯ ПРОКАТКА ЛИСТОВ И ЛЕНТ: ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, О.Д. Бирюкова, А.Е. Кожемякина

*Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия*

Выполнен краткий исторический анализ известных российских научных школ асимметричной прокатки. В статье отмечается, что начиная с 2010-х гг. вновь появился интерес к асимметричной прокатке. На эти процессы взглянули под другим углом: с точки зрения получения требуемой структуры металла. Показано, что одним из наиболее перспективных высокопроизводительных методов интенсивной пластической деформации для производства ультрамелкозернистой структуры металлических материалов является процесс асимметричной тонколистовой прокатки, основанный на целенаправленно создаваемой асимметрии за счет рассогласования окружных скоростей валков. Изложены теоретические основы использования асимметричной тонколистовой прокатки металлов и сплавов как метода интенсивной пластической деформации. Выполнено сравнение сдвиговой деформации при равноканальном угловом прессовании, симметричной и асимметричной прокатке. Показано, что при асимметричной тонколистовой прокатке с обжатием 60 % при оптимальных параметрах процесса угол сдвига превышает 80° , а истинная деформация за один проход $\approx 3,8 \dots 4,8$ по толщине листа. На основе компьютерного моделирования методом конечных элементов установлены закономерности создания сверхвысоких сдвиговых деформаций в обрабатываемых материалах, в том числе биметаллических слоистых композитах, при прокатке с рассогласованием окружных скоростей валков, а также при асимметричной криопробатке. Выполнен анализ возможности прокатки биметаллических слоистых композитов в рабочих валках со специальным микрорельефом поверхности. Приведены характеристики спроектированного и изготовленного в Южной Корее уникального опытно-экспериментального лабораторного стана дуо с индивидуальным приводом рабочих валков для реализации процессов асимметричной и аккумуляющей прокатки в режиме ИПД. Стан будет установлен в лаборатории механики градиентных наноматериалов ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова».

Ключевые слова: научные школы, асимметричная прокатка, интенсивная пластическая деформация, наноструктура, прокатный стан.

Введение

Любая прокатка является асимметричным процессом. Случай симметричной прокатки является идеализацией реальных условий.

Первые теоретические исследования по асимметричной прокатке были опубликованы Е. Зибелем, Г. Заксом и Л. Клиндером, Е. Гоффманом и Г. Заксом. Среди отечественных авторов можно выделить А.И. Целикова [1, 2], А.А. Королева [3], А.И. Гришкова [2].

Челябинской школой прокатчиков были созданы принципиально новые процессы прокатки-волочения, частичной прокатки-волочения, сдвоенной прокатки-волочения, процес-

сы в режиме заданных скоростей рабочих валков и др.; разработаны теории этих процессов (В.Н. Выдрин, Л.М. Агеев, В.Г. Шеркунов, Н.В. Судаков, В.Г. Сосюрко, В.И. Крайнов, В.Я. Тумаркин, А.П. Пелленен, А.В. Выдрин и др.) [4–8]. Развита теория асимметричных процессов для сортовой прокатки (В.Н. Выдрин, В.Г. Дукмасов).

Представители краматорской школы (В.Ф. Потапкин, В.А. Федоринов, А.В. Сатонин и др.) усовершенствовали процесс прокатки между неподвижным и приводным валками, впервые предложенный В.Н. Выдриным и Л.М. Агеевым. Создана теория этих процес-

сов, и разработан комплекс математических моделей процесса прокатки в режиме заданной величины опережения [9–12].

Московские исследователи (В.П. Полухин, А.Ф. Пименов, В.Н. Скороходов, А.И. Трайно, Н.И. Ефремов и др.) развили теорию и предложили новые технические решения асимметричной прокатки [13–18].

Большой интерес представляют также исследования В.Г. Сеницына, Г.Л. Химича, М.Я. Бровмана, В.С. Горелика, В.В. Смирнова, В.А. Николаева, А.П. Грудева и др.

Магнитогорскими учеными (В.М. Салганик, А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, Д.Н. Чикишев и др.) было показано, что основной особенностью вертикально асимметричной прокатки является поворот очага деформации под действием крутящего момента, создаваемого противоположно направленными силами трения на верхней и нижней контактных поверхностях валков в смешанной зоне очага деформации. Получены распределения нормальных и касательных напряжений по длине дуг контакта в вертикально асимметричном очаге деформации как в общем, так и для важных частных случаев прокатки. Показана возможность и целесообразность отказа от цилиндрической поверхности неподвижного деформирующего элемента. Разработаны и внедрены в производство новые совмещенные процессы асимметричной прокатки и пластической гибки, а также прокатки и штамповки, позволяющие производить детали крупногабаритных агрегатов в линии толстолистового прокатного стана [19–25].

Многочисленные исследования позволили выявить главное достоинство процесса асимметричной прокатки – существенное снижение усилия прокатки. При этом процесс имел меньше степеней свободы, труднее настраивался и контролировался. Одним из его серьезных недостатков являлась также значительная разница моментов прокатки на рабочих валках. В результате трудностей, связанных с внедрением станом и технологий асимметричной прокатки в России, от них в начале 1990-х гг. прошлого столетия практически полностью отказались. Имеющиеся станы были отправлены в утиль. Однако начиная с 2010-х гг. вновь появился интерес к асимметричной прокатке. На эти процессы взглянули под другим углом: с точки зрения получения требуемой структуры металла.

1. Асимметричная тонколистовая прокатка как метод интенсивной пластической деформации

В настоящее время создание металлических материалов с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой или наноматериалов рассматривается во всем мире как одно из ключевых направлений технологического прогресса. Одним из перспективных способов получения таких материалов являются методы интенсивной пластической деформации (ИПД). Однако существующие методы ИПД, например, такие как равноканальное угловое прессование, кручение под высоким давлением и другие, характеризуются рядом конструктивно-технологических недостатков, ограничивающих возможности их широкого промышленного применения. Среди таких недостатков следует отметить прежде всего малые размеры получаемых полуфабрикатов, низкую технологичность деформирования и, как следствие, существенные ограничения по производительности и экономической целесообразности использования таких технологий. Представленные факторы значительно сдерживают широкое промышленное производство и использование УМЗ металлических материалов.

Одним из наиболее перспективных высокопроизводительных методов ИПД для производства УМЗ металлических материалов является процесс асимметричной тонколистовой прокатки, основанный на целенаправленно создаваемой асимметрии за счет рассогласования окружных скоростей валков [26–31].

Сравнение РКУП, симметричной и асимметричной прокатки

Компьютерное моделирование и сравнительный анализ процессов РКУП, симметричной и асимметричной тонколистовой прокатки [32] для условий плоской деформации проводили в двумерной постановке задачи с использованием специализированного инженерного программного комплекса DEFORM 2D. При РКУП задавали угол пересечения каналов – 90°, радиусы скруглений – 2 мм и 1 мм, диаметр заготовки – 8 мм, длину – 40 мм. Закон контактного трения – Кулона, коэффициент трения – 0,1. Скорость деформирования – 5 мм/с. Асимметричную прокатку проводили в валках одинакового диаметра за один проход без натяжений. При этом варьировали следующие: 1) начальную толщину заготовки $h_0 = 8, 4, 2, 1$ мм; 2) диаметры валков

$D = 50, 100, 200, 300, 400, 500$ мм; 3) относительное обжатие за проход $\varepsilon = 10, 20, 30, 40, 50, 60$ %; 4) коэффициент трения $\mu = 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40$ (закон Кулона); 5) окружная скорость верхнего вала была постоянной и составляла 5 мм/с, а окружную скорость нижнего вала снижали на 1...60 % (с шагом 1 %). Во всех вариантах расчета материал заготовки – алюминиевый сплав АМг6 (аналог 5083). Деформируемая среда – вязкопластическая. Пресс-форма, пуансон, валки – недеформируемые (абсолютно жесткие). Температура заготовки – 200 °С, условия процессов – изотермические. Деформационный разогрев и теплообмен с окружающей средой не учитывали. Конечные элементы – четырехузловые, количество – 1000...1200.

При РКУП неравномерность деформации наблюдается на концевых участках, а также в приповерхностных слоях, контактирующих с пресс-формой (рис. 1). В средней части заготовки деформация является максимальной и при этом равномерной. Квадратная ячейка трансформируется в параллелограмм той же толщины. Угол сдвига φ при этом $\approx 64^\circ$ (рис. 1а). В результате интенсивность деформации в материале $\approx 1,15$ (рис. 1б). Эта величина вполне согласуется с результатом, полученным по известной аналитической формуле для расчета истинной деформации e при простом сдвиге:

$$e = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\sqrt{3}}, \quad (1)$$

где φ – угол сдвига.

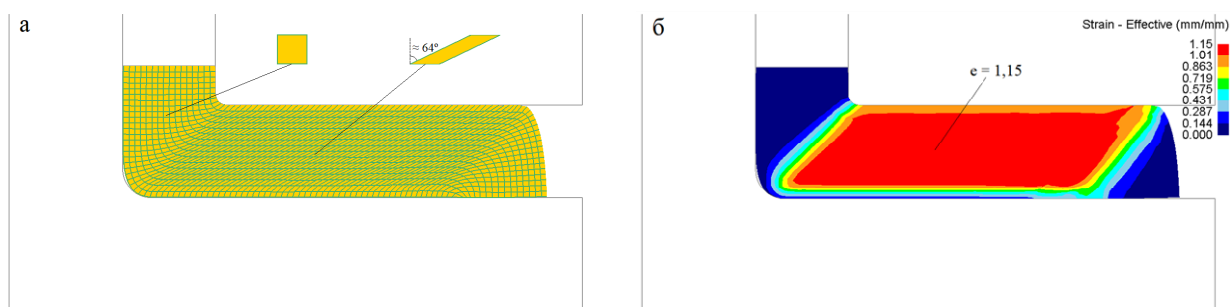


Рис. 1. Сетка Лагранжа (а) и поле интенсивности деформации (б) при обработке заготовки методом РКУП по схеме простого сдвига



Рис. 2. Поворотная деформация в процессе РКУП по схеме простого сдвига

В процессе РКУП благодаря поворотной деформации круг трансформируется в эллипс таким образом, что направление его осей непрерывно меняется (рис. 2). Это обеспечивает немонотонность деформации.

При обычной листовой прокатке по схеме чистого сдвига истинная деформация рассчитывается по формуле

$$e = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{h_0}{h_1}, \quad (2)$$

где h_0, h_1 – начальная и конечная толщина листа, соответственно.

Сравнительный анализ показывает, что истинная деформация, накопленная в материале заготовки после одного прохода РКУП, соответствует условиям симметричной прокатки с относительным обжатием $\varepsilon = 63$ % (рис. 3).

Контактное трение при симметричной прокатке оказывает влияние на возникновение небольшой неравномерности деформации по толщине листа. Однако в центральных слоях влияние трения отсутствует, и элементарная квадратная ячейка трансформируется в прямоугольник (рис. 3а), а круг – в эллипс (рис. 4), оси которого не изменяют своего положения в пространстве, т. е. деформация по схеме чистого сдвига является монотонной. Поэтому независимо от условий контактного трения величина истинной деформации в центральных слоях материала заготовки, рассчитанная методом конечных элементов, полностью совпадает с расчетом по формуле (2).

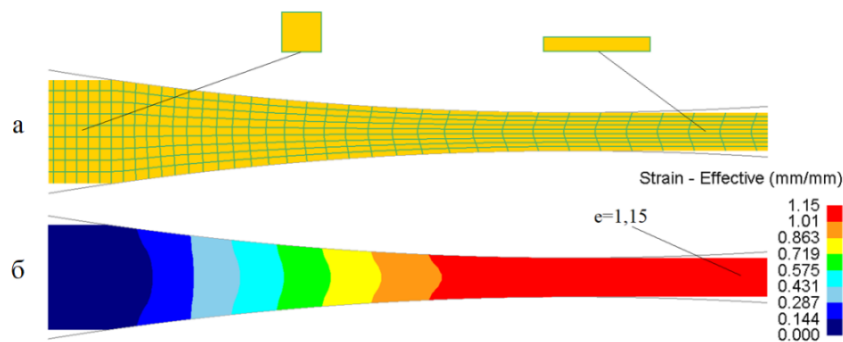


Рис. 3. Сетка Лагранжа (а) и поле интенсивности деформации (б) при симметричной прокатке по схеме чистого сдвига ($\varepsilon = 63\%$, $\mu = 0,10$)

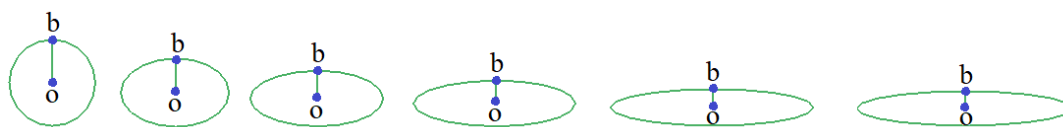


Рис. 4. Монотонная деформация в процессе симметричной листовой прокатки по схеме чистого сдвига

При асимметричной тонколистовой прокатке по схеме совмещенного простого и чистого сдвига истинная деформация рассчитывается по формуле

$$e = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\ln \frac{h_0}{h_1}\right)^2 + \frac{\text{tg}^2 \varphi}{4}}, \quad (3)$$

где h_0 , h_1 – начальная и конечная толщина листа, соответственно; φ – угол сдвига.

Каждому обжатию ε соответствует определенный уровень рассогласования скоростей валков ΔV , обеспечивающий максимум величины истинной деформации e в материале заготовки (рис. 5).

Сетка Лагранжа и поле интенсивности деформации для этого случая показаны на

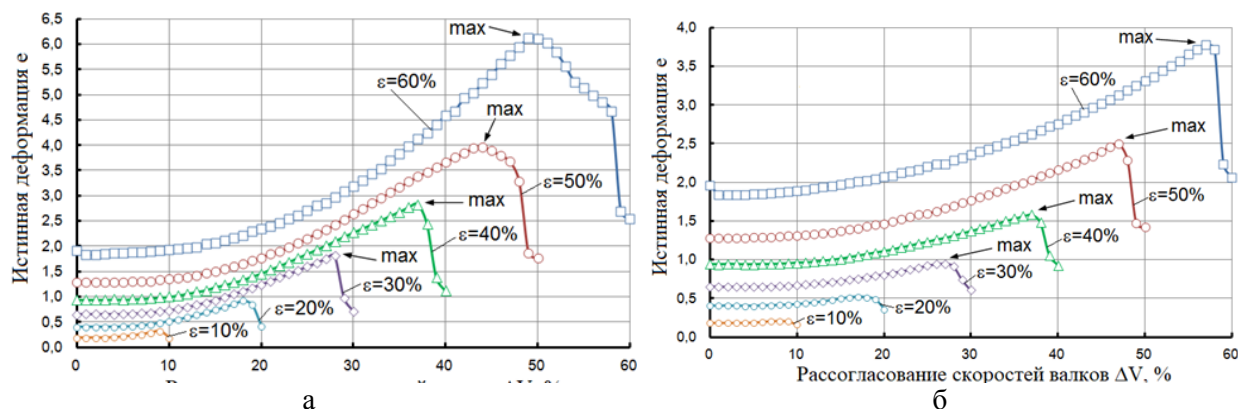


Рис. 5. Влияние относительного обжатия ε и рассогласования скоростей валков на величины истинной деформации в нижнем (а) и верхнем (б) слоях материала листа при асимметричной тонколистовой прокатке ($h_0 = 1$ мм, $D = 500$ мм, $\mu = 0,4$)

рис. 6. Квадратная ячейка трансформируется в параллелограмм (рис. 6а). Угол сдвига φ в центральном слое материала заготовки $\approx 81^\circ$ и обеспечивает истинную деформацию на уровне $e = 3,85$, что вполне согласуется с расчетом по формуле (3).

В результате поворотной деформации круг трансформируется в эллипс таким образом, что направление его осей непрерывно меняется (рис. 7). Это обеспечивает немонотонность деформации при асимметричной тонколистовой прокатке по схеме совмещенного простого и чистого сдвига.

Влияние угла сдвига на величину истинной деформации в материале заготовки при обработке различными методами показано на рис. 8. При РКУП максимальный угол сдвига

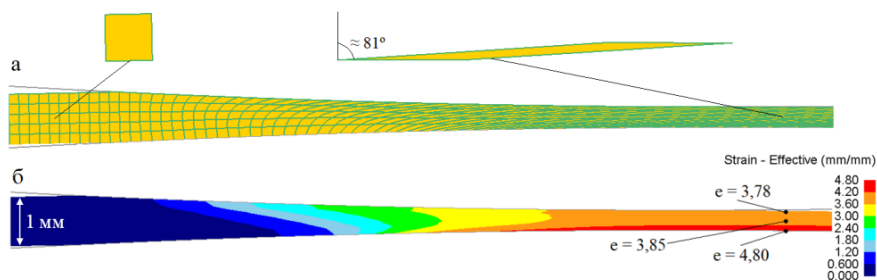


Рис. 6. Сетка Лагранжа (а) и поле интенсивности деформации (б) при асимметричной тонколистовой прокатке по схеме совмещенного простого и чистого сдвига ($D = 500$ мм, $\varepsilon = 60$ %, $\Delta V = 57$ %, $\mu = 0,4$)

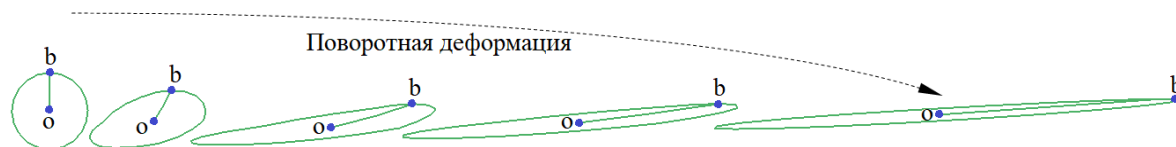


Рис. 7. Поворотная деформация при асимметричной тонколистовой прокатке по схеме совмещенного простого и чистого сдвига

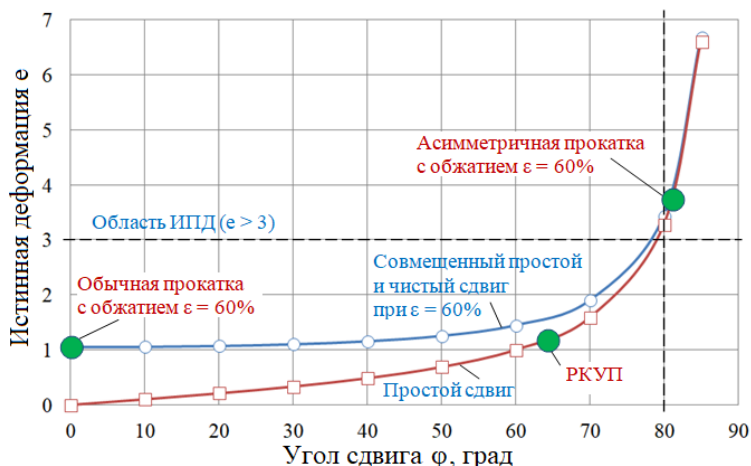


Рис. 8. Влияние угла сдвига на величину истинной деформации в материале заготовки при обработке различными методами

не превышает 64° . За один проход истинная деформация ε в материале заготовки $\approx 1,15$. На практике для получения УМЗ структуры методом РКУП требуется, как правило, не менее 3–4 проходов. В свою очередь, при асимметричной тонколистовой прокатке с обжатием 60 % при оптимальных параметрах процесса угол сдвига превышает 80° , а истинная деформация за один проход $\approx 3,8 \dots 4,8$ по толщине листа.

С практической точки зрения, для применения асимметричной прокатки в режиме ИПД необходимо иметь прокатное оборудование с возможностью создания «большого» рассогласования (50...60 % и выше) окружных скоростей рабочих валков, при этом для создания высокого противонаправленного

контактного трения прокатку необходимо проводить на сухих валках с шероховатостью 3...9 мкм R_a без использования технологической смазки при соотношении D/h не менее 400 (где D – диаметр, одинаковый для двух валков, мм; h – толщина полосы до прокатки, мм).

К числу фундаментальных механических характеристик любого металлического материала относят прочность и пластичность, имеющие четко выраженную взаимосвязь. Материалы могут быть прочными или пластичными, но редко обладают высокими значениями этих свойств одновременно. В полной мере это относится к УМЗ материалам. Это проявляется в сильном снижении у них величины равномерной деформации ε_u , когда

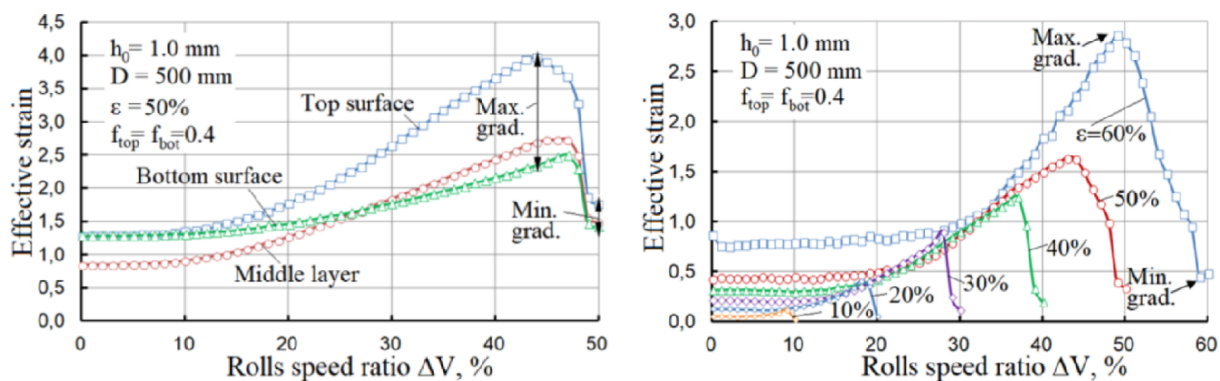


Рис. 9. Влияние рассогласования скоростей валков на градиент деформации ($\text{grad} = e_{\max} - e_{\min}$)

деформация теряет устойчивость и на растягиваемом образце возникает область локализации деформации (шейка). В результате разрушение УМЗ материала наступает на начальной стадии его деформации при $\epsilon_{\text{н}} = 1...3\%$. Отсутствие необходимого запаса пластичности является существенным недостатком УМЗ материалов и служит препятствием для их практического применения [33].

Недавние исследования показали, что создание градиентных структур, в которых размер зерна увеличивается от наномасштабного уровня у поверхности до микронного диапазона в центральном слое, является более эффективным подходом при получении металлических УМЗ материалов, обладающих одновременно высокими прочностными и пластическими свойствами [34–36].

С возрастанием рассогласования скоростей валков градиент деформации, который можно охарактеризовать как разницу между максимальным и минимальным значениями деформации по толщине листа, сначала уве-

личивается, а затем, достигнув максимума, резко снижается до минимума (рис. 9).

2. Асимметричная прокатка биметаллических слоистых композитов с рассогласованием скоростей валков в режиме ИПД

Моделирование процесса асимметричной холодной прокатки биметаллического двухслойного композита 1050/6061, с исходной толщиной 1,0 мм при толщине каждого слоя по 0,5 мм, проводили методом конечных элементов с применением программы DEFORM 2D. Асимметрию процессов создавали за счет рассогласования скоростей рабочих валков.

Скорость вращения нижнего валка, контактирующего с твердым слоем 6061, задавали равной 10 об/мин во всех вариантах расчета. Скорость верхнего валка на контакте с мягким слоем 1050 снижали на 5...50 % с шагом 5 %.

На основе компьютерного моделирования получено, что при асимметричной прокатке

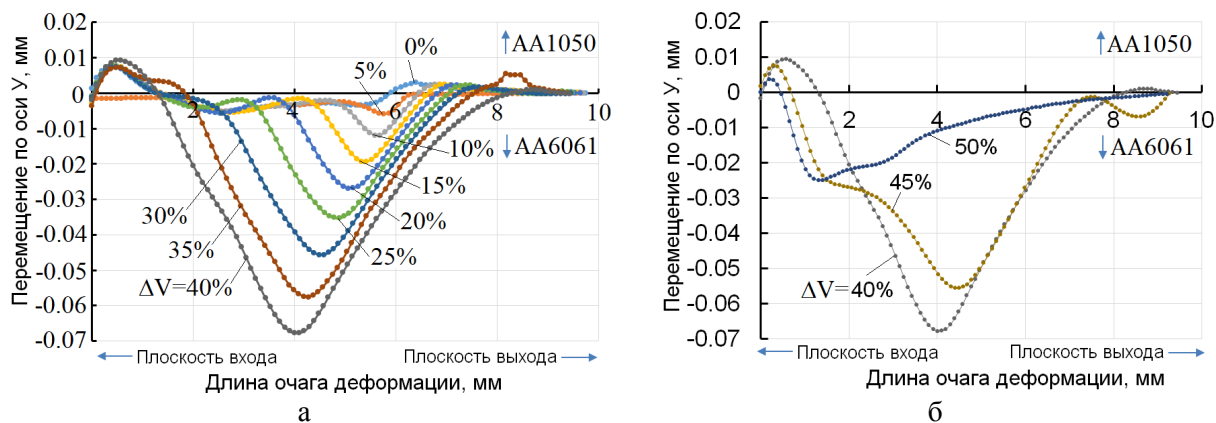


Рис. 10. Форма границы раздела в очаге деформации при асимметричной прокатке алюминиевого композита 1050/6061 в зависимости от величины рассогласования скоростей валков $\Delta V = 0...40\%$ (а) и $\Delta V = 40...50\%$ (б) (коэффициент трения 0,3)

при высоком коэффициенте трения 0,3 и с увеличением рассогласования скоростей валков ΔV с 0 до 40 % амплитуда волнообразной границы раздела в очаге деформации существенно возрастает. При увеличении ΔV с 0 до 40 % максимальное значение амплитуды возрастает с 8 мкм до ≈ 70 мкм (рис. 10). В свою очередь, при дальнейшем увеличении рассогласования скоростей до $\Delta V = \varepsilon = 50$ % происходит снижение максимального значения амплитуды $c \approx 70$ мкм до ≈ 25 мкм (см. рис. 10). Во всех случаях мягкий материал (AA1050) проникает в твердый материал (AA6061), а граница раздела в очаге деформации принимает ярко выраженную волнообразную форму с одним характерным пиком).

3. Получение слоистых композитов с помощью асимметричной криопротатки

Перспективным способом получения слоистых композитов на базе ГЦК металлов является применение технологии асимметричной криопротатки.

Компьютерное моделирование процесса асимметричной криопротатки алюминиевых биметаллических двухслойных 1050/6061 композитов проводили МКЭ с применением программы DEFORM 2D. Особенностью разбиения конечно-элементной сетки было использование на поверхности, а также на границе раздела слоя элементов толщиной 5 мкм для более точного описания деформации в этих областях.

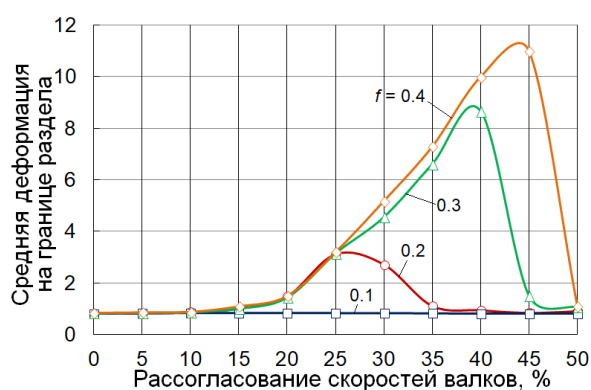


Рис. 11. Средняя деформация на границе раздела слоистого алюминиевого композита 1050/6061 в зависимости от величины рассогласования скоростей валков и коэффициента трения

Результаты компьютерного моделирования показали, что при обычной криопротатке деформация на границе раздела почти не ме-

няется даже при существенном возрастании коэффициента трения. В свою очередь, при асимметричной криопротатке деформация на границе раздела может возрасти на порядок (рис. 11).

4. Прокатка биметаллических слоистых композитов в рабочих валках со специальным микрорельефом поверхности

Для перспективной транспортной техники в автомобилестроении, железнодорожном и судовом машиностроении требуются композиционные материалы, обладающие высокой удельной прочностью, коррозионной стойкостью, уменьшенной массой и стоимостью. Таким требованиям отвечают алюминиево-стальные слоистые композиты, сочетающие высокую прочность сталей с малой плотностью и высокой коррозионной стойкостью алюминиевых сплавов.

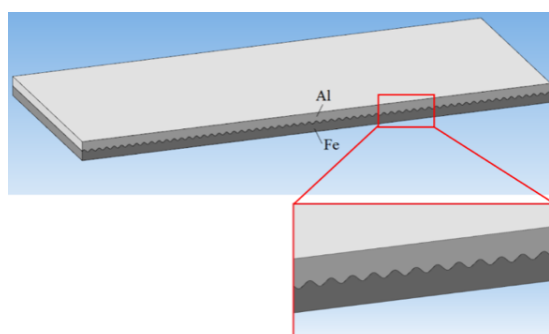


Рис. 12. Схема слоистого композита Al-Fe с волнообразной границей раздела

Повышенная прочность соединения алюминиево-стальных слоистых композитов при холодной пластической сварке может быть обеспечена за счет создания волнообразных (рис. 12) контактных поверхностей между Al и Fe с взаимным проникновением твердого материала в мягкий при активизации сдвиговых и ротационных мод пластического течения металлов.

Разработку нового процесса прокатки биметаллических слоистых композитов Al-Fe выполняли на основе конечно-элементного моделирования с применением специализированной инженерной программы QForm 2D/3D.

Прокатку слоистого композита AA6082/DC04 проводили за 2 прохода с суммарным обжатием 50 %. Причем в первом проходе деформацию осуществляли в двух валках, один из которых выполнен с гладкой бочкой,

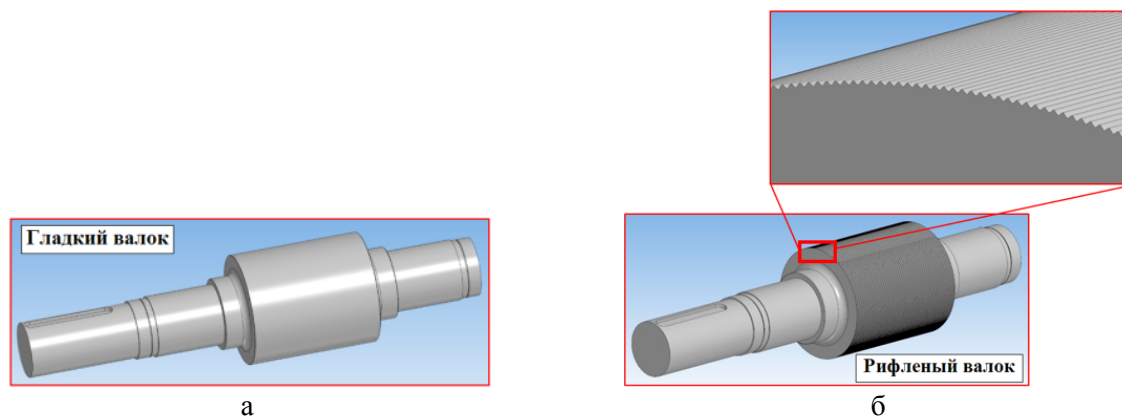


Рис. 13. Общий вид рабочих валков с гладкой бочкой (а) и специальным микрорельефом поверхности (б)

а второй валок имеет специальный микрорельеф рабочей поверхности (рис. 13). Деформацию во втором проходе выполняли в двух гладких валках.

При моделировании использовались валки диаметром 400 мм. Начальная общая толщина слоистого композита была равна 2 мм. Начальные толщины слоев были одинаковыми и равными 1 мм соответственно. Стальной композит контактировал с валком, имеющим синусоидальный микрорельеф. Прокатку во всех вариантах расчета проводили без натяжений.

В результате моделирования было получено, что в первом проходе (на этапе рифления) максимальная пластическая деформация локализуется в нижнем стальном слое композита и достигает $e \approx 3$ в областях, соответствующих вершинам синусоидального профиля на рабочем валке. При этом деформация в областях, соответствующих впадинам синусоидального профиля, является относительно невысокой и равной $e \approx 0,5$. В алюминиевом слое наиболее высокая деформация на уровне $e \approx 2$ генерировалась в области границы раздела.

После второго прохода толщина композита составила 1 мм. Максимальная пластическая деформация в нижнем стальном слое композита сохранилась на уровне $e \approx 3$ в областях, которые соответствовали вершинам синусоидального профиля рабочего валка в предыдущем проходе. При этом граница раздела в композите приобрела волнистую форму с достаточно высокой амплитудой. В алюминиевом слое в области границы раздела деформация возросла с $e \approx 2$ до $e \approx 3$. После проглаживающего прохода верхняя и нижняя

поверхности полосы были ровными, без складок и поверхностных дефектов.

Таким образом, создание волнообразной границы раздела между Al и Fe с взаимным проникновением твердого материала в мягкий в сочетании с активизацией сдвиговых и ротационных мод пластического течения металлов, инициирующих интенсивную пластическую деформацию, может обеспечить повышенную прочность соединения алюминиево-стальных слоистых композитов при холодной пластической сварке. Следует сказать, что при обычной прокатке при прочих равных условиях деформация на границе раздела составляет $e \approx 1$, что в 3 раза меньше, чем при прокатке по схеме рифление – проглаживание.

5. Опытно-экспериментальный лабораторный стан дуо с индивидуальным приводом рабочих валков для реализации процессов асимметричной и аккумулирующей прокатки в режиме ИПД

Выполненные ранее исследования показали, что целенаправленно создаваемая кинематическая асимметрия очага деформации приводит к кардинальному изменению эпюры распределения нормальных напряжений на контакте рабочих валков и листа (полосы) и, как следствие, существенно влияет на силовые параметры процесса. Установлено [37, 38], что особенностью силовых параметров процесса асимметричной прокатки в режиме ИПД является значительное снижение (в 2...3 раза) силы деформирования в сравнении с обычной прокаткой при прочих равных условиях. Однако при этом существенно возрастают моменты прокатки: до 3,5 раз – на

валке, вращающемся с большей скоростью, и до 2,5 раз – на валке, вращающемся с меньшей скоростью. Существующие на сегодняшний день лабораторные прокатные станы (не только в ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», но и в любых других научных лабораториях, институтах и университетах РФ) не отвечают необходимым техническим требованиям для реализации технологий асимметричной прокатки в режиме ИПД. Поэтому на основе научного задела, сформированного коллективом ученых Лаборатории механики градиентных наноматериалов ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» спроектирован и изготовлен не имеющий аналогов в РФ опытно-экспери-

ментальный лабораторный стан дуо с индивидуальным приводом рабочих валков для реализации процессов асимметричной и аккумулярующей прокатки в режиме ИПД с максимально допустимым усилием прокатки 2500 кН (250 тс) и крутящими моментами 2×70 кНм, что обеспечит возможность получения и испытания полноразмерных опытных образцов металлических наноматериалов.

Технические характеристики опытно-экспериментального лабораторного стана дуо представлены в таблице. Общий вид конструкции и габаритные размеры представлены на рис. 14 и 15. Все органы регулирования и контроля работы прокатного стана объедине-

Технические характеристики опытно-экспериментального лабораторного стана дуо

Параметр	Значение
Тип	Реверсивный дуо с индивидуальным приводом рабочих валков
Нажимное устройство	Гидравлическое
Диаметр рабочих валков	340 мм
Длина бочек рабочих валков	400 мм
Усилие прокатки (max)	2500 кН (250 тс)
Крутящие моменты (max)	2×60 кН·м
Мощность главного привода	2×75 кВт
Толщина прокатываемых листовых заготовок	от 50 мм до 0,5 мм
Прокатываемые материалы	Al, Fe, Ti, а также другие металлы и сплавы с σ_T до 1500 МПа
Реализуемые технологии	– симметричная прокатка; – асимметричная прокатка; – криогенная прокатка; – аккумулярующая прокатка; – инкрементальная прокатка
Общая масса оборудования	20 т

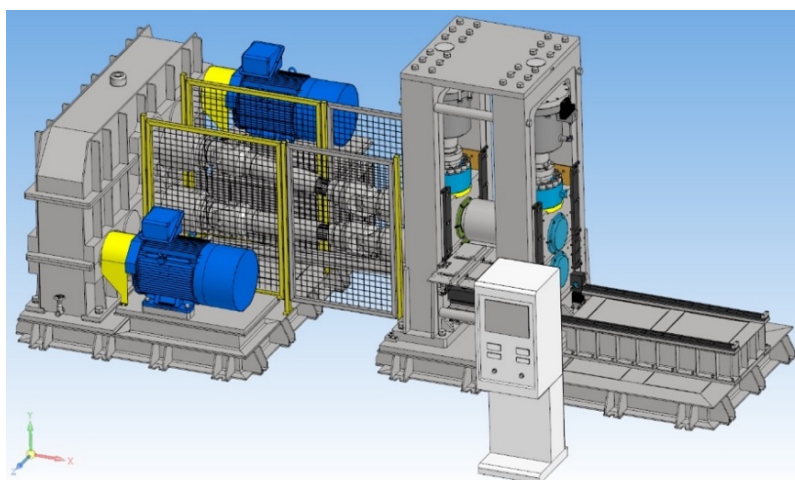


Рис. 14. Общий вид конструкции опытно-экспериментального лабораторного стана дуо с индивидуальным приводом рабочих валков для реализации процессов асимметричной и аккумулярующей прокатки в режиме ИПД

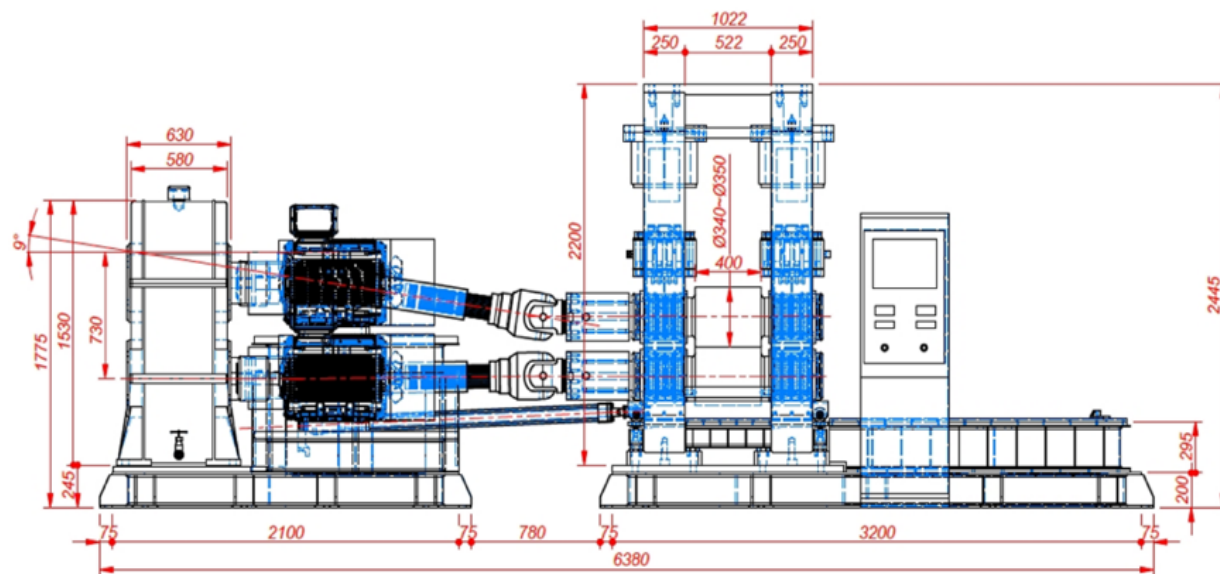


Рис. 15. Габаритные размеры опытно-экспериментального лабораторного стана дуо с индивидуальным приводом рабочих валков

ны на одном пульте управления с сенсорной панелью и расположены на безопасном удалении от стана. Система управления прокатным станом обеспечивает мониторинг в режиме реального времени с цифровой (количественной) индикацией параметров технологического процесса.

Выводы

1. С 1960-х по начало 1990-х гг. в России достаточно плодотворно развивались челябинская, краматорская, московская, магнитогорская и другие научные школы по асимметричной прокатке. Были созданы и описаны теоретически новые процессы, построены прокатные станы. Многочисленные исследования позволили выявить главное достоинство процесса асимметричной прокатки – существенное снижение усилия деформирования. При этом процесс имел меньше степеней свободы, труднее настраивался и контролировался. Одним из его серьезных недостатков являлась также значительная разница моментов прокатки на рабочих валках. В результате трудностей, связанных с внедрением станом и технологий асимметричной прокатки в России, от них в начале 1990-х гг. практически полностью отказались. Имеющиеся станы были отправлены в утиль. Однако начиная с 2010-х гг. вновь появился интерес к асимметричной прокатке. На эти процессы взглянули под другим углом: с точки зрения получения требуемой структуры металла.

2. Перспективным направлением является разработка нового промышленно применимого метода ИПД на базе процесса асимметричной прокатки и/или криопробки с использованием специальных механических схем, обеспечивающих высокие или сверхвысокие сдвиговые деформации, а также немонотонность течения металла. При асимметричной тонколистовой прокатке по схеме совмещенного простого и чистого сдвига поворотная мода деформации обеспечивает немонотонность течения металла, что является одним из ключевых признаков, позволяющих отнести данный способ обработки металлов давлением к методам ИПД. При оптимальных параметрах процесса асимметричной тонколистовой прокатки истинная деформация за 1 проход может соответствовать 3–4 проходам РКУП. С практической точки зрения для этого требуется применение прокатного оборудования с возможностью создания «большого» рассогласования (50...60 % и выше) окружных скоростей валков. Способ асимметричной прокатки имеет потенциал практического применения в заготовительном производстве в качестве метода ИПД тонких металлических листов и полос из различных металлов и сплавов.

3. Асимметричная тонколистовая прокатка может применяться также для целенаправленного создания градиента деформации по толщине обрабатываемых металлов и сплавов с целью формирования в них градиентных

микроструктур, обеспечивающих одновременное повышение прочности и пластичности листовых полуфабрикатов.

4. Представлены некоторые результаты выполненных исследований перспективных технологий получения слоистых композиционных материалов типа Al–Al и Al–steel новыми прогрессивными методами обработки металлов давлением – асимметричной прокаткой, а также прокаткой в рабочих валках со специальным микрорельефом поверхности. Показано, что новые способы прокатки могут обеспечить повышенную прочность соединения слоев композита за счет создания интенсивной пластической деформации на границе раздела слоев.

5. Разработано техническое задание на проектирование опытно-экспериментального стана асимметричной прокатки с индивиду-

альным приводом рабочих валков, предназначенного для практической реализации новых разрабатываемых технологий получения градиентных, бимодальных и гетерогенных наноматериалов. Изготовлен новый прокатный стан, который в июне 2020 г. будет установлен в лаборатории механики градиентных наноматериалов.

6. В дальнейших работах планируется проведение обширных экспериментальных исследований закономерностей эволюции структуры и свойств металлов и сплавов при асимметричной прокатке в режиме интенсивной пластической деформации.

Работа выполнена при поддержке Мегагранта (соглашение № 074-02-2018-329, тема 2018-08 МГ), гранта Российского фонда фундаментальных исследований (договор Д № 18-58-45013/18, тема 2018-08 РФФИ).

Литература

1. Целиков, А.И. Теория прокатки / А.И. Целиков, Г.С. Никитин, С.В. Рокотян. – М.: Металлургия, 1980. – 319 с.
2. Целиков, А.И. Теория прокатки / А.И. Целиков, А.И. Гришков. – М.: Металлургия, 1970. – 358 с.
3. Королёв, А.А. О холодной прокатке с рассогласованием скоростей валков / А.А. Королёв // Сталь. – 1973. – № 10. – С. 906–910.
4. Выдрин, В.Н. Сдвоенная прокатка-волочение – новый технологический процесс прокатки / В.Н. Выдрин // Изв. вузов. Чёрная металлургия. – 1974. – № 11. – С. 64–66.
5. Выдрин, В.Н. Поведение концов и геометрия полосы: учеб. пособие по курсу «Теория прокатки». – Челябинск: ЧПИ, 1981. – Ч. IV. – 81 с.
6. Выдрин, В.Н. Принципиальные и теоретические основы нового процесса «прокатка-волочение» / В.Н. Выдрин, Л.М. Агеев // Теория и технология прокатки: сб. науч. тр. – Челябинск, 1971. – Вып. 76. – С. 3–21.
7. Выдрин, В.Н. Динамика прокатных станов / В.Н. Выдрин. – Свердловск: Металлургиздат, 1960. – 255 с.
8. Выдрин, В.Н. Исследование непрерывной прокатки в станах с одним приводным валком / В.Н. Выдрин, В.И. Крайнов // Теория и технология прокатки: сб. науч. тр. – Свердловск, 1967. – Вып. 162. – С. 31–38.
9. Потапкин, В.Ф. Клеть стана холодной прокатки лент / В.Ф. Потапкин, В.А. Федоринов, И.С. Стеценко // Оборудование для прокатного производства: реф. сб. ЦНИИТЭИтяжмаш. – 1979. – № 1. – С. 10.
10. Потапкин, В.Ф. Нормальные контактные напряжения при прокатке с волочением и обычной прокатке / В.Ф. Потапкин, В.А. Федоринов, А.В. Сатонин // Оборудование для прокатного производства: реф. сб. ЦНИИТЭИтяжмаш. – 1977. – № 10. – С. 19–22.
11. Потапкин, В.Ф. Исследование напряжённо-деформированного состояния металла при прокатке-волочении / В.Ф. Потапкин, В.А. Федоринов, А.В. Сатонин // Изв. вузов. Чёрная металлургия. – 1983. – № 11. – С. 75–80.
12. Потапкин, В.Ф. Особенности деформации металла при асимметричной прокатке тонких полос / В.Ф. Потапкин, А.В. Сатонин, Ю.К. Доброносков // Изв. АН СССР. Сер. Металлы. – 1987. – № 4. – С. 62–66.
13. Асимметричные процессы прокатки – анализ, способы и перспективы применения / А.Ф. Пименов, В.Н. Скороходов, А.И. Трайно и др. // Сталь. – 1982. – № 3. – С. 53–56.

14. Получение высокоточного холоднокатаного листа для офсетной печати способом несимметричной прокатки. Сообщение 1 / А.Ф. Пименов, В.П. Полухин, В.Н. Скороходов и др. // Изв. вузов. Чёрная металлургия. – 1980. – № 9. – С. 64–67.
15. Получение высокоточного холоднокатаного листа для офсетной печати способом несимметричной прокатки. Сообщение 2 / А.Ф. Пименов, В.П. Полухин, В.Н. Скороходов и др. // Изв. вузов. Чёрная металлургия. – 1980. – № 11. – С. 67–72.
16. Полухин В.П., Скороходов В.Н. Расчёт параметров несимметричного процесса прокатки тонких полос. Сообщение 1 // Изв. вузов. Чёрная металлургия. – 1977. – № 1. – С. 169–170.
17. Полухин, В.П. Контактное взаимодействие металла с валками при несимметричной прокатке тонких полос. Сообщение 1 / В.П. Полухин, В.Н. Скороходов // Изв. вузов. Чёрная металлургия. – 1976. – № 12. – С. 81–84.
18. Ефремов, Н.И. Разработка технологии асимметричной прокатки на основе результатов исследования особенностей напряжённо-деформированного состояния тонкого листа в очаге деформации: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н.И. Ефремов. – М., 1985. – 22 с.
19. Салганик, В.М. Асимметричная тонколистовая прокатка: развитие теории, технологии и новые решения / В.М. Салганик, А.М. Песин. – М.: МИСИ, 1997. – 192 с.
20. Песин, А.М. Моделирование и развитие процессов асимметричного деформирования для повышения эффективности листовой прокатки / А.М. Песин // Моделирование и развитие процессов ОМД. – 2002. – № 1. – С. 107–113.
21. Pesin A.M. Scientific school of asymmetric rolling in Magnitogorsk // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2013. – № 5 (45). – С. 23–28.
22. Плющение ленты: теория, технология, новые решения / А.М. Песин, В.М. Салганик, К.Ю. Куранов и др. – Магнитогорск, 2002. – 144 с.
23. Процессы асимметричной прокатки: теория и технологические решения / В.М. Салганик, А.М. Песин, Д.Н. Чикишев и др. – Магнитогорск, 2013. – 128 с.
24. Салганик, В.М. Новые способы и устройства асимметричной прокатки полос / В.М. Салганик, А.М. Песин, Ю.А. Шабалин // Чёрная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 1990. – № 9. – С. 61–63.
25. Песин, А.М. Моделирование и развитие процессов асимметричного деформирования для повышения эффективности листовой прокатки: дис. ... д-ра техн. наук / А.М. Песин. – Магнитогорск: Магнитогор. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2003. – 395 с.
26. Valiev, R.Z. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation / R.Z. Valiev, R.K. Islamgaliev, I.V. Alexandrov // Progress in Materials Science. – 2000. – Vol. 45, no. 2. – P. 103–189.
27. Еникеев, Н.А. Границы зёрен и сверхпрочность наноструктурных материалов: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.02.04, 01.04.07 / Еникеев Нариман Айратович; [Место защиты: Ин-т проблем машиноведения РАН]. – Уфа, 2016. – 252 с.
28. Утяшев, Ф.З. Деформационные методы получения и обработки ультрамелкозернистых и наноструктурных материалов / Ф.З. Утяшев, Г.И. Рааб; Акад. наук Республики Башкортостан, Отд-ние физ.-мат. и техн. наук. – Уфа: Гилем, 2013. – 375 с.
29. Рааб, Г.И. Перспективы использования методов интенсивной пластической деформации для получения высокопрочных металлических материалов в промышленных масштабах / Г.И. Рааб // Сборник материалов IV международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». – М.: ИМЕТ РАН, 2011. – С. 205–206.
30. 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, no. 1. – P. 14–17.
31. Ji, Y.H. Finite Element Analysis of Severe Deformation in Mg-3Al-1Zn Sheets through Differential-Speed Rolling with a High Speed Ratio / Y.H. Ji, J.J. Park, W.J. Kim // Materials Science and Engineering: A. – 2007. – Vol. 454. – P. 570–574.
32. Математическое моделирование и сравнительный анализ деформированного состояния металла при асимметричной прокатке и равноканальном угловом прессовании / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, С.А. Губанов, А.Э. Новоселов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2018. – № 4. – С. 175–181.
33. Малыгин, Г.А. Прочность и пластичность нанометаллов с бимодальной зеренной структурой / Г.А. Малыгин // Физика твердого тела. – 2008. – Т. 50. – С. 990–996.

34. Lu, K. *Making strong nanomaterials ductile with gradients* / K. Lu // *Science*. – 2014. – Vol. 345. – P. 1455–1456.

35. *Revealing Extraordinary Intrinsic Tensile Plasticity in Gradient Nano-Grained Copper* / T.H. Fang, W.L. Li, N.R. Tao, K. Lu // *Science*. – 2011. – Vol. 331. – P. 1587–1590.

36. *Strain heterogeneities in the rolling direction of steel sheets submitted to the skin pass: A finite element analysis* / A. Giarola, P. Pereira, P. Stemler et al. // *Journal of Materials Processing Technology*: A. – 2015. – Vol. 216. – P. 234–247.

37. Песин, А.М. *Моделирование напряженно-деформированного состояния при асимметричной тонколистовой прокатке алюминиевого сплава 5083 в условиях сверхвысоких сдвиговых деформаций* / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, Р.К. Вафин // *Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: материалы двенадцатой Всерос. науч.-практ. конф., с междунар. участием*. – 2015. – Т. II. – С. 372.

38. Песин, А.М. *Анализ силовых параметров процесса асимметричной листовой прокатки алюминиевого сплава 5083 в условиях сверхвысоких сдвиговых деформаций* / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, Р.К. Вафин // *Металлургия: технологии, инновации, качество / под общ. ред. Е.В. Протопопова*. – 2015. – С. 160–167.

Песин Александр Моисеевич, д-р техн. наук, профессор, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; pesin@bk.ru.

Пустовойтов Денис Олегович, канд. техн. наук, доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; pustovoytov_den@mail.ru.

Бирюкова Олеся Дмитриевна, аспирант, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; fimapationchik@inbox.ru.

Кожемякина Анна Евгеньевна, аспирант, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; kozhemiakina.a@yandex.ru.

Поступила в редакцию 11 февраля 2020 г.

DOI: 10.14529/met200309

ASYMMETRIC ROLLING OF SHEETS AND STRIPS: HISTORY AND DEVELOPMENT PROSPECTS

A.M. Pesin, pesin@bk.ru,

D.O. Pustovoytov, pustovoytov_den@mail.ru,

O.D. Biryukova, fimapationchik@inbox.ru,

A.E. Kozhemyakina, kozhemiakina.a@yandex.ru

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

A brief historical analysis of asymmetric rolling by well-known Russian scholarly traditions was carried out in this article. The article notes that there has been renewed interest in asymmetric rolling since the 2010s. These processes were considered from a different angle in terms of obtaining the required metal structure. It is shown that one of the most advanced high-performance methods of severe plastic deformation for the metal materials ultrafine-grained structure production of is the process of asymmetric fine-sheet rolling, based on purposefully created asymmetry due to the mismatch of the rolls peripheral speeds. The theoretical foundations of the metals and alloys asymmetric fine-sheet rolling as a method of severe plastic deformation are presented. A comparison of the shear deformation during equal-channel angular pressing for symmetric and asymmetric

rolling is made. It is shown that in asymmetric fine-sheet rolling process with a reduction of 60% at optimal process parameters, the shear angle exceeds 80° , and the true strain in one pass is $\approx 3.8 \dots 4.8$ in sheet thickness. The regularities of the ultra-high shear deformations creation in the processed materials are established based on computer modeling by the finite element method. It includes bimetallic layered composites, during rolling with a mismatch of the rolls peripheral speeds, as well as during asymmetric cryogenic rolling. The analysis of the rolling bimetallic-layered composites possibility in work rolls with a special surface microrelief is carried out. The characteristics of a unique experimental laboratory duo mill with an individual drive of the work rolls for the asymmetric and accumulating rolling processes implementation in the SPD mode, designed and manufactured in South Korea, are given. The mill will be installed in the laboratory of gradient nanomaterials mechanics of the Nosov Magnitogorsk State Technical University.

Keywords: schools of thought, asymmetrical rolling, severe plastic deformation, nanostructure, rolling mill.

References

1. Tselikov A.I., Nikitin G.S., Rokotyana S.V. *Teoriya prokatki* [Rolling theory]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1980. 319 p.
2. Tselikov A.I., Grishkov A.I. *Teoriya prokatki* [Rolling theory]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970. 358 p.
3. Korolev A.A. [On cold rolling with speed mismatch of rolls]. *Stal'*, 1973, no. 10, pp. 906–910. (in Russ.)
4. Vydrin V.N. [Double rolling-drawing – a new technological process of rolling] *Izv. vuzov. Chornaya metallurgiya*, 1974, no. 11, pp. 64–66. (in Russ.)
5. Vydrin V.N. *Povedeniye kontsov i geometriya polosy* [Behavior of the ends and geometry of the strip]. Chelyabinsk, ChPI Publ., 1981, part. 4. 81 p.
6. Vydrin V.N., Ageyev L.M. [Fundamental and theoretical foundations of the new process “rolling-drawing”]. *Teoriya i tekhnologiya prokatki: collection of scientific papers*. Chelyabinsk, 1971, iss. 76, pp. 3–21. (in Russ.)
7. Vydrin V.N. *Dinamika prokatnykh stanov* [The dynamics of rolling mills]. Sverdlovsk, Metallurgizdat Publ., 1960. 255 p.
8. Vydrin V.N., Kraynov V.I. [Research of continuous rolling in mills with one drive roll]. *Teoriya i tekhnologiya prokatki: collection of scientific papers*. Sverdlovsk, 1967, iss. 162, pp. 31–38. (in Russ.)
9. Potapkin V.F., Fedorinov V.A., Stetsenko I.S. [Stand of cold strip rolling mill]. *Oborudovaniye dlya prokatnogo proizvodstva: abstract collection TSNITEItyazhmash*, 1979, no. 1, p. 10. (in Russ.)
10. Potapkin V.F., Fedorinov V.A., Satonin A.V. [Normal contact stresses during rolling with drawing and conventional rolling]. *Oborudovaniye dlya prokatnogo proizvodstva: abstract collection TSNITEItyazhmash*, 1977, no. 10, pp. 19–22. (in Russ.)
11. Potapkin V.F., Fedorinov V.A., Satonin A.V. [Investigation of the stress-strain state of metal during rolling-drawing]. *Bulletin of universities. Ferrous metallurgy*, 1983, no. 11, pp. 75–80. (in Russ.)
12. Potapkin V.F., Satonin A.V., Dobronosov Yu.K. [Peculiarities of metal deformation during asymmetric rolling of thin strips]. *Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Ser. Metals*, 1987, no. 4, pp. 62–66. (in Russ.)
13. Pimenov A.F., Skorokhodov V.N., Trayno A.I. et al. [Asymmetric rolling processes – analysis, methods and perspectives of application]. *Stal'*, 1982, no. 3, pp. 53–56. (in Russ.)
14. Pimenov A.F., Polukhin V.P., Skorokhodov V.N. et al. [Obtaining high-precision cold-rolled sheet for offset printing by asymmetric rolling. Communication 1]. *Bulletin of universities. Ferrous metallurgy*, 1980, no. 9, pp. 64–67. (in Russ.)
15. Pimenov A.F., Polukhin V.P., Skorokhodov V.N. et al. [Obtaining high-precision cold-rolled sheet for offset printing by asymmetric rolling. Communication 2]. *Bulletin of universities. Ferrous metallurgy*, 1980, no. 11, pp. 67–72. (in Russ.)
16. Polukhin V.P., Skorokhodov V.N. [Calculation of the parameters of the asymmetric process of rolling thin strips. Message 1]. *Bulletin of universities. Ferrous metallurgy*, 1977, no. 1, pp. 169–170. (in Russ.)

17. Polukhin V.P., Skorokhodov V.N. [Contact interaction of metal with rolls during asymmetric rolling of thin strips. Communication 1]. *Bulletin of universities. Ferrous metallurgy*, 1976, no. 12, pp. 81–84. (in Russ.)
18. Efremov N.I. *Razrabotka tekhnologii asimmetrichnoy prokatki na osnove rezul'tatov issledovaniya osobennostey napryazhënno-deformirovannogo sostoyaniya tonkogo lista v ochage deformatsii: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Development of asymmetric rolling technology based on the results of studying the features of the stress-strain state of a thin sheet in the deformation zone. Abstract of cand. sci. diss.]. Moscow, 1985. 22 p.
19. Salganik V.M., Pesin A.M. *Asimmetrichnaya tonkolistovaya prokatka: razvitiye teorii, tekhnologii i novyye resheniya* [Asymmetric sheet rolling: development of theory, technology and new solutions]. Moscow, MISIS Publ., 1997. 192 p.
20. Pesin A.M. [Modeling and development of asymmetric deformation processes to improve the efficiency of sheet rolling]. *Modelirovaniye i razvitiye protsessov OMD* [Modeling and development of metal forming], 2002, no. 1, pp. 107–113. (in Russ.)
21. Pesin A.M. Scientific school of asymmetric rolling in Magnitogorsk. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2013, no. 5 (45), pp. 23–28.
22. Pesin A.M., Salganik V.M., Kuranov K.Yu., Trakhtengerts E.L., Chernyakhovskiy M.B., Rudakov V.P. *Plyushcheniye lenty: teoriya, tekhnologiya, novyye resheniya* [Flattening of the ribbon: theory, technology, new solutions]. Magnitogorsk, 2002. 144 p.
23. Salganik V.M., Pesin A.M., Chikishev D.N., Berezhnaya G.A., Pustovoytov D.O. *Protsessy asimmetrichnoy prokatki: teoriya i tekhnologicheskiye resheniya* [Processes of asymmetric rolling: theory and technological solutions]. Magnitogorsk, 2013. 128 p.
24. Salganik V.M., Pesin A.M., SHabalin Yu.A. [New methods and devices for asymmetric rolling of strips]. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information], 1990, no. 9, pp. 61–63. (in Russ.)
25. Pesin A.M. *Modelirovaniye i razvitiye protsessov asimmetrichnogo deformirovaniya dlya povysheniya effektivnosti listovoy prokatki: dis. d-ra tekhn. nauk* [Modeling and development of asymmetric deformation processes to improve the efficiency of sheet rolling. Doct. sci. diss.]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2003. 395 p.
26. Valiev R.Z., Islamgaliev R.K., Alexandrov I.V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. *Progress in Materials Science*, 2000, vol. 45, no. 2, pp. 103–189. DOI: 10.1016/s0079-6425(99)00007-9
27. Enikeev N.A. *Granitsy zëren i sverkhprochnost' nanostrukturnykh materialov: dis. d-ra fiz.-mat. nauk* [Boundaries of grains and superstrength of nanostructural materials. Doct. sci. diss.]. Ufa, 2016. 252 p.
28. Utyashev F.Z., Raab G.I. *Deformatsionnyye metody polucheniya i obrabotki ul'tramelkozernistykh i nanostrukturnykh materialov* [Deformation methods of obtaining and processing ultrafine-grained and nanostructured materials]. Ufa, Gilem, 2013. 375 p.
29. Raab G.I. [Prospects for the use of methods of severe plastic deformation for the production of high-strength metal materials on an industrial scale]. *Collection of materials of the IV international conference "Deformation and destruction of materials and nanomaterials"*. Moscow, IMET RAN Publ., 2011, pp. 205–206. (in Russ.)
30. Ji Y.H., Park J.J. Development of Severe Plastic Deformation by Various Asymmetric Rolling Processes. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, vol. 499, no. 1, pp. 14–17. DOI: 10.1016/j.msea.2007.11.099
31. Ji Y.H., Park J.J., Kim W.J. Finite Element Analysis of Severe Deformation in Mg–3Al–1Zn Sheets through Differential-Speed Rolling with a High Speed Ratio. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, vol. 454, pp. 570–574. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.11.076>
32. Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Gubanov S.A., Novoselov A.E. [Mathematical modeling and comparative analysis of the deformed state of metal during asymmetric rolling and equal-channel angular pressing]. *Procurement production in mechanical engineering*, 2018, no. 4, pp. 175–181. (in Russ.)
33. Malygin G.A. [Strength and plasticity of nanometals with bimodal grain structure]. *Physics of the Solid State*, 2008, vol. 50, pp. 990–996. (in Russ.)

34. Lu K. Making strong nanomaterials ductile with gradients. *Science*, 2014, vol. 345, pp. 1455–1456. DOI: 10.1126/science.1255940

35. Fang T.H., Li W.L., Tao N.R., Lu K. Revealing Extraordinary Intrinsic Tensile Plasticity in Gradient Nano-Grained Copper. *Science*, 2011, vol. 331, pp. 1587–1590. DOI: 10.1126/science.1200177

36. Giarola A., Pereira P., Stemler P., Pertence A., Campos H., Aguilar M., Cetlin P. Strain heterogeneities in the rolling direction of steel sheets submitted to the skin pass: A finite element analysis. *Journal of Materials Processing Technology: A*, 2015, vol. 216, pp. 234–247. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.09.015

37. Pesin A.M., Pustovoitov D.O., Vafin R.K. [Modeling the stress-strain state during asymmetric thin-sheet rolling of aluminum alloy 5083 under conditions of ultra-high shear deformations]. *Modern problems of the mining and metallurgical complex. Science and production Materials of the Twelfth All-Russian Scientific and Practical Conference, with international participation*, 2015, p. 372.

38. Pesin A.M., Pustovoitov D.O., Vafin R.K. Edited by E.V. Protopopov [Analysis of the force parameters of the asymmetric sheet rolling process of aluminum alloy 5083 in conditions of ultra-high shear deformations]. *Metallurgy: technologies, innovations, quality*, 2015, pp. 160–167.

Received 11 February 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Асимметричная прокатка листов и лент: история и перспективы развития / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, О.Д. Бирюкова, А.Е. Кожемякина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 81–96. DOI: 10.14529/met200309

FOR CITATION

Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Biryukova O.D., Kozhemyakina A.E. Asymmetric Rolling of Sheets and Strips: History and Development Prospects. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 81–96. (in Russ.) DOI: 10.14529/met200309
