

С.А. Машеков¹, Е.З. Нугман¹, Э.А. Тусупкалиева¹, А.С. Машекова¹

¹Казахский национальный исследовательский технический университет
им. К. И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан

ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРУТКОВ НА РАДИАЛЬНО-СДВИГОВОМ СТАНЕ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ

Аннотация. Предложен радиально-сдвиговой стан (РСС) новой конструкции, позволяющий совмещением прокатки и прессования получать прутки и проволоки высокого качества. Исследовано напряженно-деформированное состояние заготовки из алюминиевого сплава 7075 при прокатке в гладких валках, установленных на существующем РСС, а также при прессовании на РСС новой конструкции. Методом конечных элементов и программой MSC. SuperForge получены количественные данные и установлены основные закономерности распределения НДС, температуры при прокатке заготовок в гладких валках и обработке заготовок новым совмещенным процессом, прокатка в винтообразных валках и прессование в матрице. Установлено, что при обработке заготовки из алюминиевого сплава 7075 в винтообразных валках и матрице, установленных на РСС новой конструкции, по сечению изготовленной прутков формируется мелкозернистая структура способствующая повышению качества металлопродукции.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, рекристаллизация, полигонизация, прокатка, прессование, численное моделирование, интенсивность напряжений и деформаций.

• • •

Түйіндеме. Құрылымы жаңа радиалды-ығыстыру орнағы (РБИО) ұсынылды, бұл илектеу мен престеуді біріктіру арқылы жоғары сапалы шыбықтар мен сымдарды алуға мүмкіндік береді. Стерженьдер мен сымдарды басуға арналған радиалды-ығыстыру диірменінде негізгі жетегі, жұмыс стенді, орама қондырғысы және пресс-қалып бар. 7075 алюминий қорытпасынан жасалған дайындаманың кернеулі-деформациялық күйі қолданыстағы ПКО-да орнатылған тегіс орамдарда илектеу кезінде, сондай-ақ құрылымы жаңа РБИО-да басу кезінде зерттелді. Шеткі элемент әдістемесімен және MSC.SuperForge бағдарламасымен беті жазық пішінбіліктермен дайындаманы илемдегенде және бұрандалы пішінбіліктерде илемдеуді және ұяқалыпта баспақтауды өзіне қосатын қиыстырылған процеспен дайындаманы өндегенде пайда болатын ҚДК және температураның таралу заңдылықтары анықталды және сандық мөлшерлері табылды. 7075 алюминий қорытпасынан жасалған шы-

бықтарды беті жазық пішінбіліктерде илемдегенде және бұрандалы пішінбіліктерде илемдеуді және ұяқалыпта баспақтауды өзіне қосатын қиыстырылған процеспен өңдегенде қолданылған технологиялық режимдердің шыбық құрылымының қалыптасуына әсері жұмыста зерттелген.

Түйінді сөздер: алюминий қорытпасы, құрылым, рекристаллизация, қайту, полигонизация, илемдеу, баспақтау, сандық модельдеу, кернеу мен деформация қарқындылығы.

• • •

Abstract. The radial-shift (RSM) of a new design is given in this article, which allows obtaining high quality rods and wires by combination of rolling and pressing processes. Geometric dimensions of rolls protrusion and cavity gradually decrease in the direction of the pressing. The stress- strained state of the billet from aluminum alloy 7075 when rolling on the even rolls, which mounted on the existing RSM, and also when pressing on the RSM of a new design is investigated in this work. With help of final elements method and MSC.SuperForge program the quantitative date is gained, and the new regularities of stress-strain behavior, of temperature distribution when the billet rolling on sleek rolls and treatment of billets by a new combined process of rolling in helical rolls and the pressing in matrix are established. It is established, that at the billet processing from aluminum alloy 7075 in helical rolls and matrix, mounted on the RSM of a new design, the fine-grained structure, contributing to improve the quality of metal products in cross section of produced rods is formed.

Keywords: aluminum alloys, recrystallization, polygonization, rolling, pressing, numerical modeling, stress and strain intensity.

Введение. В настоящее время из алюминиевых сплавов изготавливают большую номенклатуру продукции [1]. Среди данной продукции значительный интерес имеют алюминиевые профили, прутки и проволоки с повышенной прочностью. По мере роста объема выпуска вышеперечисленной продукции область её применения существенно увеличивается. Алюминиевые профили, прутки и проволоки в большом объеме используются в капитальном и жилом строительстве, в вагоностроении и судостроении, при строительстве коттеджей и для внутренней и внешней отделки промышленных интерьеров и т.д. Современное развитие технологии прокатно-прессового мини-производства характеризуется ресурсо- и энергосберегающей технологией и стремлением использовать все металлические отходы металлургической и машиностроительной отрасли [2,3]. В мини-производствах применяются совмещенные технологии, где путем использования нескольких металлургических переделов и операций выпускают метал-

лопродукцию. При этом, оборудование мини-производства работает на организационных принципах единого агрегата для производства заданной продукции. Следует отметить, что оптимизация эксплуатационных свойств выпускаемой продукции невозможна без улучшения оборудования и создания его новых видов. Развитие данных взаимосвязанных сторон технического прогресса должны обеспечивать получение конкурентоспособной продукции с минимальными затратами.

Необходимо отметить, что виды совмещения технологических процессов прокатно-прессового производства очень разнообразны [4,5]. Особенно важным достижением в этом направлении является совмещение процессов литья и прокатки, а также литья и прессования. Благодаря рациональному выбору и компактному расположению основного и вспомогательного оборудования удалось создать мини-производства – небольшой литейно-прокатный или литейно-прессовый комплекс с непревзойденными технико-экономическими показателями. Первыми промышленными способами непрерывного прессования различных по номенклатуре профилей являлись установки Конформ, Экстроллинг, Линекс [6,7]. Анализ известных работ [8], посвященных прессованию заготовок на установках Конформ, Экстроллинг, Линекс, показал, что в настоящее время проведены многочисленные теоретические и экспериментальные исследования. С помощью этих исследований разработаны математические модели процесса прессования изделий, определены напряженно-деформированное состояние (НДС) обрабатываемого материала и обоснованно выбраны параметры температурно-деформационных режимов обработки заготовок на вышеперечисленных установках. С помощью этих исследований решены комплексы задач по усовершенствованию оборудования, оптимизации параметров рабочих инструментов установок непрерывного действия. Вышеотмеченные результаты привели к следующим преимуществам: за счет легкой замены инструмента установки приобрели хорошую технологическую гибкость; простоту кинематической схемы; сваривание металла в очаге деформации; за счет теплового эффекта повышена пластичность и возможность прессования пресс-изделий в условиях холодной деформации. Однако, ряд конструктивных и эксплуатационных недостатков задержали промышленное применение вышеприведенных непрерывных установок. Это связано с тем, что обсуждаемые установки имели ряд значимых недостатков, вызванных с невысокой надежностью системы, невысоким качеством пресс-изделий и сравнительно маленькой производительностью установок.

В конце XX века возрос интерес к установке непрерывного прессования. Конформ и фирмы разных стран создали различные системы непрерывного прессования [9,10]. В большинстве случаев, в усовершенствованных установках применили жестко закрепленный инструмент, называемым башмаком, и вращающийся колесный инструмент с канавкой по периферии. При этом, в торце башмака установили матрицу. Следует отметить, что большинство данных установок сохраняли недостаток первоначальной установки Конформ [11]. К данным недостаткам можно отнести: для создания достаточных по величине активных сил трения при прессовании, сечение заготовки должно точно соответствовать сечению канала; величина активных сил трения не поддается регулировке и как правило значительно превышает требуемое значение; неоправданно большие энергетические затраты; сильны разогрев деформирующего инструмента и, как следствие, низкая его стойкость; из-за неравномерного распределения деформации формирование неоднородных свойств в изделиях. Возможно, причиной неравномерности деформации является возникновение реактивных сил трения на контакте металл – прессовый узел (башмак). Неоднородность свойств изделий не вполне приемлемо, например, для продукции электротехнического назначения.

Для устранения вышеперечисленных недостатков фирма «Кастэкс» (Великобритания) разработала другой вариант непрерывного прессования Конформ [12]. В состав промышленной установки «Кастэкс С300Н» входит машина для непрерывной подачи в ручей колеса жидкого металла и прессовое оборудование. По мере вращения колесного инструмента прессового оборудования жидкий металл кристаллизуется и, далее выдавливается по способу Конформ. Подача жидкого металла прямо в контейнер установки Конформ и непрерывное прессования закристаллизованного металла даёт возможность значительно уменьшить металлоёмкость производственных линий, улучшить их гибкость и уровень автоматизации. Кроме того, на этой линии выпускаются пресс-изделия высокого качества, с низкой себестоимостью и небольшим объемом технологических отходов (3–7 % вместо 25–45 % традиционных). Фирмы «Holton Machinery» и «Babcock Wire Equipment» (Великобритания) выпускают промышленную линию по методу Конформ, предназначенные для выпуска пресс-изделий [13]. Например, фирмой «Holton Machinery» выпускаемая установка, имеет диаметр колеса 400 мм, а габаритные размеры – 27250×6800×4380 мм. При этом, мощность привода равняется

150 кВт. На данной установке производят провода с поперечным сечением 16-300 мм², различные электрошины, трубы небольшого размера и др.

Фирмами Outokumpu Holton Ltd. (ранее Holton Machinery Ltd.) и BWE Ltd. (ранее Babcock Wire Equipment) [14, 15] создана промышленная непрерывная линия на базе способа Конформ для непрерывного прессования различных профилей. В данной линии установленная машина Конформ работает совместно с литейными кристаллизаторами роторного типа. Данная промышленная линия является достаточно компактной и дает возможность изготавливать пресс-изделия различной номенклатуры из медных и алюминиевых сплавов. Однако, множество деталей и узлов, сложность кинематической схемы позволяют считать её применение неперспективным. Необходимо отметить, что применение непрерывной линии Конформ с заливкой жидкого металла в ручей инструмента приводит к слипанию затвердевающего металла на входную часть жестко закрепленного инструмента [16]. Отверждение жидкого металла на криволинейной поверхности инструмента под действием давления обработки не даёт возможности управлять ходом прессования, приводит к существенной неоднородности напряжений и деформации. Вышеотмеченный недостаток можно устранить путем совершенствования конструкции кристаллизатора.

Интерес представляет способ непрерывного прессования «Экстролдинг». При использовании данного способа, пресс-изделия изготавливают путем совмещения в одном очаге деформации процессов прокатки и прессования [17]. К отличительным особенностям данного способа можно отнести действия активных сил контактного трения между валками и заготовкой. За счет этих сил производят выдавливание горячего или холодного металла через отверстие матрицы. Преимуществом данного процесса является незначительная потеря энергосиловых параметров на трение, характерная для прокатки и высокая производительность за счёт большой вытяжки, характерной для прессования [18-20]. Инженерами фирмы Western Elektrik (США) предложен оригинальный способ Лайнекс [21, 22]. При реализации данного способа давление, необходимое для осуществления прессования, создаётся за счёт применения активных сил трения, которые появляются между плоскими поверхностями звеньев бесконечных цепей и деформируемой заготовки. Данный метод используют для выпуска алюминиевых прутков, проволоки и шин на предприятиях фирмы Venscuck (США). Следует отметить, что по сравнению с коэф-

фициентом вытяжки, применяемом при изготовлении пресс-изделий способом Конформ, коэффициент вытяжки используемом в этом способе не превышает двадцати, т.е. в несколько раз меньше по сравнению с устройством Конформ.

Впрочем, способ Лайнекс даёт возможность прессовать высококачественные по структуре и точные по геометрическим размерам готовые изделия, при этом не применяются вспомогательные операции, из-за отсутствия пресс-остатка и более полно применяется материал заготовки, кроме того существенно уменьшаются капитальные вложения при строительстве мини-производства и снижаются энергозатраты в процессе эксплуатации. Следует обратить внимание, что технология мини-производства различных профилей на большинстве заводов мира отличается дискретностью операций плавки, литья, прокатки, прессования, термообработки, а применяемое оборудование – большой энерго- и металлоемкостью, требует значительных производственных площадей, что, в конечном счете, повышает себестоимость продукции [23]. Использование прессованных профилей в различной отрасли производства и выявление их дефектов всегда сопровождается усовершенствованием способов обработки и конструкций существующего оборудования. Поэтому в течение многих десятилетий разрабатываются новые технологии и оборудование, позволяющие превращать дискретные операции в непрерывный процесс. Однако, большинство исследований являются разрозненными по постановке, касаются частных задач, имеют, в основном, эмпирический характер. Поэтому, найденные решения не дают общих и радикальных решений для всех видов операции, используемых при непрерывном прессовании профилей из металлов и сплавов. Таким образом, большинство известных решений не позволяют создать научно-обоснованный непрерывный режим прессования профилей различной номенклатуры. Отсутствие единого подхода к оценке динамики изменения НДС во многих предлагаемых вариантах изготовления профилей является слабым местом современной металлообработки. Стоит отметить, что в настоящее время специализированные программы имитационного моделирования широко используются для исследования совмещенных процессов и процессов винтовой и радиально-сдвиговой прокатки [24]. При этом, многие исследования направлены на изучение стационарных процессов изготовления круглых сплошных и полых профилей [25,26]. В то время как, нестационарные динамические процессы прессования заготовок переменного диаметра

тра в круглый пруток или проволоку постоянного диаметра мало изучены в известных литературах.

Цель работы – определение НДС заготовок переменного диаметра и оценка структурного состояния готовых изделий из алюминиевого сплава 7075 имитационным динамическим моделированием совмещенного процесса обработки прутков на радиально-сдвиговом стане (РСС) новой конструкции

Материалы и методики исследований. В настоящей работе предложен РСС новой конструкции [27]. На данном стане совмещением горячей винтовой прокатки и прессования получают металлические прутки малых диаметров или проволоки с мелкозернистой структурой. РСС для прессования прутков и проволок содержит главный привод, рабочую клеть, валковый узел и пресс-матрицу. Трехвалковая рабочая клеть РСС состоит из станины, в расточках которой через 120° смонтированы узлы рабочих валков. Рабочие валки смонтированы на подушках. Крутящий момент к валкам передается через шпиндели от электродвигателей. Валки данного стана имеют гладкую поверхность и волнисто-конусообразные участки захвата и обжатия и калибрующий участок. Заметим, что выступы и впадины волнисто-конусообразных участков выполнены по винтовой линии. При этом геометрические размеры выступов и впадин постепенно уменьшаются в направлении прессования.

Для разработки технологического процесса позволяющего равномерно распределять накопленную деформацию, т.е. получать прутки и проволоки из металлов и сплавов высокого качества, а также для определения оптимальной величины единичного обжатия были исследованы НДС заготовки при деформации их в РСС новой и существующей конструкции. Для расчета НДС, силовых и температурных режимов деформации прутков и проволок использовали программный комплекс MSC.SuperForge [28]. Можно отметить, что предлагаемый процесс прессования прутков является чрезвычайно сложным процессом. Связано это с тем, что во время прессования заготовка деформируется непрерывно в РСС с винтообразными валками, а далее экструдирована через матрицу. В работе трехмерная геометрическая модель заготовки, валков и матрицы была построена в CAD программе Inventor и импортирована в CAE программу MSC.SuperForge. При создании конечно-элементной модели заготовки, валков и матрицы был использован трехмерный объемный элемент TETRA (четырёхузловой тетраэдр), применяемый для моделирова-

ния трехмерных тел. Время расчета процесса составило 30 - 40 мин. на компьютере PentiumDuo с тактовой частотой 3,4 ГГц и оперативной памятью 2 Гбайта. Для исследования процесса прессования в новом и прокатки в существующем РСС использовали круглую заготовку из алюминиевого сплава 7075 размером $\varnothing 40 \times 150$ мм. Прессование и прокатку заготовки на данных станах осуществляли при температуре 300°C до диаметра 9 мм. Для моделирования пластичности материала заготовки выбрали упругопластическую модель Джонсона-Кука. Из базы данных программного комплекса «MSC.SuperForge» задавали реологические свойства.

Для расчета НДС, температурного поля и силовых параметров использовали техническую характеристику предлагаемого и существующего РСС. В MSC.SuperForge инструменты принимаются абсолютно жёсткими и обеспечивают только свойства теплопроводности и теплопередачи, т.е. удельная теплопроводность, удельная теплоемкость и плотность приняты во внимание, а механические свойства игнорируются. Из базы данных материалов назначили материалом инструмента сталь 9Х1. Для этого материала плотность и тепловые свойства программа назначила по умолчанию. Так как процессы прессования и прокатки проходят при комнатной температуре, начальную температуру инструментов приняли равной 20°C. Контакт между инструментом и прутком смоделирован трением по Кулону, коэффициент трения был принят 0,3.

Запускали программу «MSC.SuperForge» и шаговым методом рассчитывали контактное давление, НДС, силовые параметры и распределение температур по объему прессуемой или прокатываемой заготовки. При этом для наглядности отображения результатов расчета взяли данные для четырех стадий в процентном отношении к полному времени деформирования, т.е. были выбраны следующие интервалы: первая стадия 25, вторая стадия 50, третья стадия 75 и четвертая стадия 100% от полного времени деформирования. В работе для определения размеров зерен прутков, прессованных на новом РСС или прокатанных на существующем РСС, применили модель измельчения зёрен металлов и сплавов по Джонсону-Мейлу-Аврами-Колмогорову [29]. Для определения коэффициентов уравнения Аврами для алюминиевого сплава 7075 провели серии экспериментов на торсионном пластометре STD 812. При проведении экспериментов варьировали скорость и степень деформации, температуру и оценивали их влияние на структуру. Коэффициенты уравнения Авра-

ми рассчитывали методом наименьших квадратов. С учетом найденных коэффициентов средний размер зерен определяли по следующей формуле:

- средний размер динамический рекристаллизованных зерен:

$$d_{DRX} = 76,962 \cdot d_o^{0,22} \cdot \varepsilon^{-0,61} \dot{\varepsilon}^{-0,0412} \exp(-1902,72/RT). \quad (1)$$

- средний размер мединамический рекристаллизованных зерен:

$$d_{MRX} = 23,34 \cdot d_o^{0,28} \cdot \varepsilon^{-0,39} \dot{\varepsilon}^{-0,0346} \exp(-1902,72/RT). \quad (2)$$

- средний размер статический рекристаллизованных зерен:

$$d_{SRX} = 31,08 \cdot d_o^{0,21} \cdot \varepsilon^{-0,39} \dot{\varepsilon}^{-0,0297} \exp(-1902,72/RT). \quad (3)$$

Средний размер зерна за весь процесс деформации вычисляли по уравнению:

$$d_{avq} = X_{SRX} d_{SRX} + X_{MRX} d_{MRX} + X_{DRX} d_{DRX} + (1 - (X_{SRX} + X_{MRX} + X_{DRX})) d_o. \quad (4)$$

Полученные результаты и их обсуждение

При прессовании на новом и прокатке на существующем РСС полученные картины распределение НДС и температурные поля алюминиевого сплава 7075 показаны, соответственно, на рисунках 1 и 2.

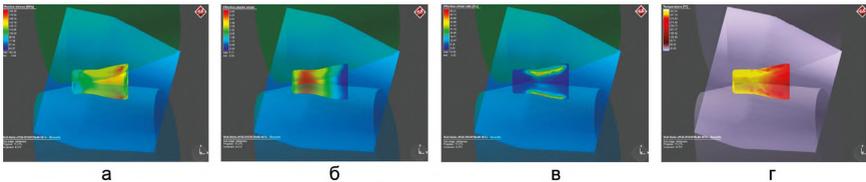


Рисунок 1 – Картина распределения интенсивности напряжения (б) деформации (а), скорости деформации (в) и температурного поля (г) при прокатке заготовок в РСС существующей конструкции (температура прокатки 300°С)

На основе полученных результатов численного моделирования прокатки заготовок из алюминиевого сплава 7075 в гладких валках существующего РСС установлено, что интенсивность напряжений, деформаций и скорости деформации приобретают наибольшее значение в поверхностных зонах заготовки, в то время как в центральной зоне имеют наименьшую величину (рисунок 1, а, б, в); деформируемый металл течет по винтовой траектории с различными скоростями внешнего и внутреннего слоя, что приводит к возникновению макросдви-

говых деформаций в поверхностных зонах заготовки; возникающие макросдвиговые деформации приводят к увеличению интенсивности деформации в поверхностной зоне прокатываемых прутков (рисунок 1,б); увеличение коэффициента вытяжки, углов подачи и раскатки приводит к ещё большему повышению интенсивности деформации и скорости деформации в поверхностной зоне заготовки; температура деформируемой заготовки повышается в зонах контакта заготовки с инструментом (рисунок 1,з); в очаге деформации возникает сжимающие главные напряжения σ_1 , σ_2 и σ_3 при этом в центральных слоях заготовки возникает разноименная схема напряженного состояния, что может привести к разрушению материала заготовки.

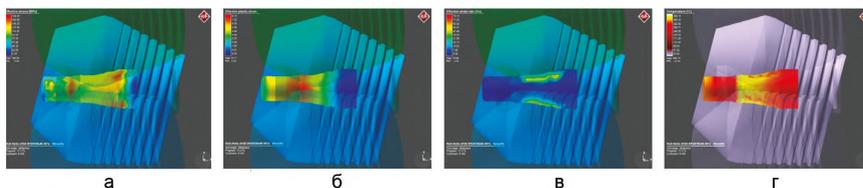


Рисунок 2 – Картина распределения интенсивности напряжения (б) деформации (а), скорости деформации (в) и температурного поля (г) при прессовании заготовок в РСС новой конструкции (температура прессования 300°С)

На основании полученных результатов численного моделирования обработки заготовки из алюминиевого сплава 7075 в винтообразных валках и матрице РСС новой конструкции установлено, что в начальном этапе деформации контактное давление локализуется в зонах захвата заготовки с рабочими поверхностями валков, а далее увеличивается по всему очагу деформации; значение контактного давления в процессе прессования возрастает как в матрице, что свойственно процессу выдавливания, так и на валках. Все это связано с ростом давления подпора в очаге деформации от действия силы выдавливания металла через матрицу; на поверхности заготовки возникают небольшие по величине растягивающие главные напряжения σ_1 , при этом во внешнем слое на каждый элемент действует сжимающие главные напряжения σ_2 и σ_3 ; в центральных слоях прессуемой заготовки возникают сравнительно большие по величине сжимающие главные напряжения σ_1 , σ_2 и σ_3 , что позволяет без нарушения сплошности материала заготовки изготавливать изде-

лия; интенсивности напряжений, деформации и скорости деформации приобретают наибольшее значение в поверхностных зонах заготовки, деформируемых в винтообразных валках, в то время как в центрально зонах имеют умеренную величину (рисунок 2, а, б, в), при этом в ходе прессования заготовки в матрице данные показатели выравниваются по всему сечению изготавливаемого изделия; деформируемый металл течет по винтовой траектории с различными скоростями внешнего и внутреннего слоя, что приводит к возникновению мощных макросдвиговых деформаций по объему заготовки; возникновение мощных макросдвиговых деформаций приводит к значительному увеличению интенсивности деформации в поверхностных зонах заготовки (рисунок 2, б), при этом данные величины выравниваются при прохождении металла через матрицу; увеличение коэффициента вытяжки, углов подачи и раскатки приводит к еще большему повышению интенсивности деформации и скорости деформации по всему поперечному сечению заготовки; температура деформируемой заготовки повышается в зонах контакта заготовки с инструментом, при этом температура заготовки особенно высоко увеличивается на участках, располагаемой перед матрицей РСС (рисунок 2, г).

Следует отметить, что при деформировании заготовки в винтообразных валках, установленных на РСС новой конструкции, металл заготовки течёт по винтовой траектории с различными скоростями деформации, как во внешних и внутренних слоях заготовки, так и в выступах и впадинах данных валков. Движение потоков металла в выступах и впадинах по винтовой линии с различными скоростями деформации вызывает увеличение сдвиговых деформаций по объему заготовки. Это приводит к значительному увеличению интенсивности деформации при прессовании заготовки на новом РСС, по сравнению с интенсивностью деформаций полученных при прокатке в гладких валках, установленных в существующем стане (рисунки 1, в и 2, в). Увеличение интенсивности деформации должно привести к интенсивному измельчению структуры исходной заготовки. Расчёт средних размеров зёрен по вышеприведённым формулам показал, что прокатка прутков из алюминиевого сплава 7075 на гладких валках существующего стана при температуре 300°C приводит к формированию разнозернистой структуры. При этом в периферийных зонах заготовки образуется мелкозернистая структура со средним размером зерен 33 мкм, а в центральных слоях – крупнозернистая структура со средним размером зерен 112 мкм. Это означает, что при

прокатке заготовок в гладких валках существующего стана в структуре металла периферийных зон прутков проходит первичная рекристаллизация. Известно, что прохождение именно этого процесса сопровождается формированием мелкозернистой структуры. Образование крупнозернистой структуры в центральных слоях заготовки связано с прохождением разупрочняющих процессов как возврат и полигонизация.

Оценка микроструктуры заготовок из алюминиевого сплава 7075, прокатанных в начале в винтообразных валках, а в последующем прессованных в матрице, показал, что при температуре обработки 300°C в металле заготовки формируется мелкозернистая структура. При этом средний размер зерен в периферийной части заготовки равняется 11 мкм, а в центральных слоях - 16 мкм. Образование мелкозернистой структуры можно связать с прохождением устойчивой первичной рекристаллизации по всему объему заготовки при прессовании заготовок на РСС новой конструкции. На основе полученных данных можно сделать вывод, что при прокатке заготовок в гладких валках существующего стана в периферийных зонах заготовки проходит рекристаллизационные процессы, в то время как в центральных зонах заготовки протекает, исходный размер зёрен почти сохраняющих разупрочняющие процессы, как возврат и полигонизация. При прокатке заготовок в винтообразных валках нового РСС рекристаллизационные процессы в периферийных областях заготовки проходят намного легче, чем в центральных областях. Считаем, что причиной хорошего прохождения такого разупрочняющего процесса являются повышенные значения интенсивности деформации и температуры в периферийных зонах прокатываемой заготовки. При этом, величина интенсивности деформации намного превышает критическую степень деформации. Дальнейшее прессование заготовки в матрице нового стана приводит к менее интенсивному прохождению мединамической и динамической рекристаллизации в периферийных зонах и интенсивному их прохождению центральных областях заготовки. Причиной такого сравнительно медленного прохождения рекристаллизации в периферийных зонах заготовки является увеличение силы трения в зоне контакта металла заготовки с инструментом.

Выводы. Таким образом, во время прокатки заготовки в винтообразных валках нового стана средний размер зёрен в центральных слоях заготовки больше, чем в поверхностных зонах заготовки. Однако, после прессования заготовки через матрицу размеры зёрен по

сечению прутка выравниваются. Результаты моделирования показали, что применение РСС новой конструкции позволяет эффективно деформировать структуру из алюминиевого сплава 7075 по всему сечению заготовки и тем самым получить прутки с мелкозернистой структурой. Показано, что возникающее при обработке на РСС новой конструкции вращательно-поступательное деформирование заготовки, обеспечивает развитие сдвиговых деформаций по всему сечению заготовки, что приводит к формированию мелкозернистой структуры в прутках из алюминиевых сплавов 7075.

Список литературы

1 Васечко, Д.Ю. Конъюнктура мировых рынков меди и алюминия / Кабели и Провода, 2011. №2. – С. 10-12.

2 Локшин М.З. Современное производство прессованных изделий из алюминиевых сплавов. 2003, №6. –С. 79–80.

3 Логинов, Ю.Н. Непрерывные методы литья и прокатки в производстве контактного провода для железнодорожного транспорта / Ю.Н. Логинов, Р.К. Мысык // Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies, 2014. – Т.3. – № 7. – С. 316-326.

4 Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Загиров Н.Н. Прогрессивные технологии совмещенной обработки цветных металлов и сплавов Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет». Научные работы. «Металлургия». 2008. Выпуск10(141). – С. 241-245.

5 Сидельников С.Б., Горохов Ю.В., Беляев С.В. Инновационные совмещенные технологии при обработке металлов. Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии, 2015, 8 (2), 185-191 [Sidelnikov, S.B., Gorokhov U.V., Belyaev S.V. Innovative combined technologies for metals processing. Journal of Siberian Federal University. Part: Engineering and technologies, 2015, 8(2), 185-191 (in Russian)]

6 Горохов Ю.В., Тимофеев В.Н., Беляев С. В., Авдулов А.А., Усков И.В., Губанов И.Ю., Авдулова Ю.С., Иванов А.Г. Прессовый узел установки Conform для непрерывного прессования цветных металлов. Известия высших учебных заведений // Цветная металлургия. 2017. – № 4. – С. 69–75.

7 Мочалин И.В., Горохов Ю.В., Беляев С.В., Губанов И.Ю. Экструдирование медных шин на установке «Конформ» с форкамерой // Цветные металлы. 2016. – № 5. - С. 75–78.

8 Горохов Ю.В., Беляев С.В., Мочалин И.В., Усков И.В., Губанов И.Ю., Горохова Т. Ю., Храмцов П. А. Моделирование в DEFORM-3D непрерывного прессования медных шин на

установке Конформ с форкамерной матрицей. Журнал Сибирского федерального университета // Техника и технологии. 2016. – № 9 (6). – С. 821–829.

9 *Солопко И.В.* Автоматизированный расчет оптимальных размеров инструмента при проектировании экспериментальной установки для непрерывного литья-прессования методом Конформ // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: Труды VIII Всероссийской научно – практической конференции / под редакцией С.М. Кулакова, Л.П. Мышляева; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2011. – С.458-463.

10 *Шимов Г.В., Фоминых Р. В., Ефремова А.С., Ковин Д.С.* Исследование траекторий течения непрерывнолитой меди при прессовании способом Conform // «Цветные металлы». 2018. – № 4. – 79 - 85.

11 *Горохов Ю.В., Шеркунов В.Г., Константинов И.Л.* Методология исследования совмещенного процесса непрерывного литья и прессования металлов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2015. – Т. 15, № 2. - С. 82–88

12 *Rajendran N., Valberg H., Misiolek W.Z.* The FEM Simulation of Continuous Rotary Extrusion (CRE) of Aluminum Alloy AA3003 // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1896. DOI: 10.1063/1.5008049.

13 *Kumari S., Rai A.K., Sinha D.K., Francis R.Ch.* Deformation Behavior and Characterization of Copper Alloy In Extrusion Process // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2015. – Vol. 6 (7). – P. 72–78.

14 *Xin-bing Y. et al.* Continuous extrusion and rolling forming velocity of copper strip // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 2013. Vol. 23. P. 1108–1113.

15 *Cho J.R., Jeong H.S.* CONFORM process: surface separation, curling and process characteristics to the wheel diameter // Journal of Materials Processing Technology. 2003. – Vol. 136. – P. 217–226.

16 *Горохов Ю.В., Солопко И.В., Катрюк В.П.* Экспериментальная установка для совмещения непрерывного литья и прессования цветных металлов на базе карусельного кристаллизатора // Цветные металлы-2011: Сб. научн. статей. – Красноярск: ООО «Версо», 2011. – С.579 -581.

17 *Сидельников С.Б.* Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов: монография [Текст] / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, Н.Н. Загиров. - М.: МАКС Пресс, 2005. - 344 с.

18 *Фастыковский, А.Р.* Развитие научных основ и разработка совмещенных методов обработки металлов давлением, обеспечивающих экономию материальных и энергетических ресурсов: авто-

реф. дис. ... д-ра техн. наук / Фастыковский Андрей Растиславович. – Новокузнецк, 2011. – 38 с.

19 *Matveeva, I.* Development and research of new aluminium alloys with transition and rare-earth metals and equipment for production of wire for electrotechnical applications by methods of combined processing / I. Matveeva, N. Dovzhenko, S. Sidelnikov, L. Trifonenkov, V. Baranov, E. Lopatina // TMS Light Metals 2013 - At the TMS 2013 Annual Meeting and Exhibition, 2013. – P. 443-447.

20 *Горохов Ю.В., Солопко И.В., Константинов И.Л.* Основы проектирования конструктивных параметров установки непрерывного литья-прессования металлов. Вестник МГТУ им. Г.И. Носова, 2009, 3, 20-23 [Gorokhov U.V., Solopko I.V., Constantinov I.L. The principles of designing of constructional parameters of metals continual casting-extrusion. Vestnik MG TU, 2009, 3, 20-23 (in Russian)]

21 *Горохов, Ю.В., Шеркунов В.Г., Довженко Н.Н.* Основы проектирования процессов непрерывного прессования металлов: монография [и др.] – Красноярск: Сибирский Федеральный ун-т, 2013. – 224 с.

22 *Горохов Ю.В., Солопко И.В., Суслов В.П., Крылов М.А.* Особенности пластического течения материала заготовки в деформационной зоне при непрерывном прессовании способом «Конформ» // Цветные металлы. 2010. – № 12. – С. 69–71.

23 *Сидельников, С.Б. Гришечкин А.И., Довженко Н.Н.* Проектирование и освоение опытно-промышленной установки совмещенной прокатки-прессования // Технология легких сплавов. - 2002. - № 5-6. - С. 41 - 44.

24 *Скуратов А.П., Горохов Ю.В., Потапенко А.С.* Применение САД систем при моделировании тепловых процессов в установке непрерывного литья и прессования цветных металлов. Труды IV всероссийской научно-практической конференции: Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах. Новокузнецк, 2016, 154-158 [Skuratov A.P., Gorokhov U.V., Potapenko A.S. Applying CAD-systems to model thermal processes in an equipment of continual casting and extrusion of non-ferrous metals. Reports of IV all-russian scientific conference: Modeling and high-tech technologies in technical and socialeconomic systems. Novokusnetsk, 2016, 154-158 (in Russian)]

25 *Stefanik A., Morel A., Mroz, S., Szota P.* «Theoretical and experimental analysis of aluminium bars rolling process in three-high skew rolling mill» Archives of Metallurgy and Materials. Vol. 60, Issue 2, 2015. Pp 809-813.

26 *Galkin, S.P., Romantsev, B.A., Kharitonov, E.A.* Putting into practice innovative potential in the universal radial-shear rolling process. CIS Iron and Steel Review 2014(9), с. 35-39.

27 S. A. Mashekov, A. E. Nurtazaev, A. S. Mashekova, E. Z. Nugman, U.D.Angarbekov, B.A. Bekbosynova. Automated control system of the radial-shear press mechanism of a new design. Scientific research of the SCO countries: synergy and integration, Materials of the International Conference, July 31, 2019 Beijing, China 2019, P. 174-182, ISBN 978-5-905695-45-2.

28 Солдаткин А., Голенков Ю., и др. Программа MSC.SuperForge как один из элементов системы виртуального производства и управления качеством изделий.//САПР и графика, 2000, №7, с. 11-13.

29 Jonsson M. An Investigation of Different Strategies for Thermo-mechanical Rolling of Structural Steel Heavy Plates // ISIJ International, – Vol. 46 (2006), No. 8, pp. 1192-1199.

Машеков С.А. - доктор технических наук, профессор

Нугман Е.З. - кандидат технических наук

Тусупкалиева Э.А. - доктор PhD, e-mail: elatus78@mail.ru.

Машекова А.С. - магистр, e-mail: ms.mashekova@mail.ru