



УДК 621.735

Поступила 04.10.2021

ИЗУЧЕНИЕ ЭВОЛЮЦИИ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА ПРИ КОВКЕ В БОЙКАХ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ, РЕАЛИЗУЮЩИХ ЗНАКОПЕРЕМЕННОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ, НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А. Б. НАЙЗАБЕКОВ, Е. А. ПАНИН, В. Е. ПИЩИКОВ, Рудненский индустриальный институт, г. Рудный, Казахстан, ул. 50 лет Октября, 38. E-mail: naizabekov57@mail.ru

Д. В. КУИС, Белорусский государственный технологический университет, г. Минск, Беларусь, ул. Свердлова, 13А. E-mail: KuisDV@belstu.by

В работе было проведено исследование эволюции микроструктуры металла при ковке в бойках новой конструкции, реализующих знакопеременное деформирование на основе компьютерного моделирования методом конечных элементов. Проведено изучение влияния угла наклона плоской грани, для чего были исследованы модели с углом наклона 0, 15, 30 и 45 град. Установлено, что наиболее оптимальным вариантом является использование бойков с углом 30 град. Далее на этой конфигурации бойков проведено изучение влияния различных значений температур нагрева заготовки и скоростей движения пуансона. Анализ влияния данных технологических параметров на эволюцию микроструктуры показал, что оба рассмотренных параметра оказывают влияние на интенсивность измельчения структуры, при этом влияние температуры нагрева более существенное.

Ключевые слова. Ковка, протяжка, деформация сдвига, компьютерное моделирование, эволюция микроструктуры.

STUDY OF THE MICROSTRUCTURE EVOLUTION DURING FORGING IN STRIKERS OF A NEW DESIGN IMPLEMENTING ALTERNATING DEFORMATION BASED ON COMPUTER MODELING

A. B. NAIZABEKOV, E. A. PANIN, V. E. PISHCHIKOV, Rudny Industrial Institute, Rudny, Kazakhstan, 38, 50 let Oktyabrya str. E-mail: naizabekov57@mail.ru

D. V. KUIS, Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus, 13A, Sverdlova str. E-mail: KuisDV@belstu.by

The study of the microstructure evolution during forging in strikers of a new design implementing alternating deformation based on computer modeling by the finite element method was carried out. The influence of the inclination angle of a flat face was studied, for which models with an angle of inclination of 0, 15, 30 and 45 degrees were studied. It is established that the most optimal option is the use of strikers with an angle of 30°. Further, on this configuration of strikers, the influence of different values of the workpiece heating temperatures and the punch movement speeds were studied. The analysis of the influence of these technological parameters on the microstructure evolution showed that both considered parameters affect the intensity of structure grinding, while the influence of the heating temperature is more significant.

Keywords. Forging, broaching, shear deformation, computer modeling, microstructure evolution.

В традиционных операциях обработки металлов давлением для повышения качества металла за счет измельчения структуры до мелкозернистого состояния необходимо значительно изменять размеры заготовки, что приводит к большим энерго- и трудозатратам. Однако зачастую требуется получение заготовки, размеры которой не намного отличаются от исходной. Реализация этих двух принципов на практике возможна за счет интенсификации сдвиговых и знакопеременных деформаций [1]. При этом для качественной проработки исходной структуры необходимо обеспечить такой технологический процесс деформирования, чтобы достаточная сдвиговая или знакопеременная деформация происходила во всем деформируемом объеме [2]. В настоящее время для решения данной задачи разработан целый ряд новых технологических процессовковки и инструментов для их реализации [3–7], позволяющих осуществлять в процессе деформирования высокий уровень сдвиговых или знакопеременных деформаций.

В работе [8] была разработана и исследована технология протяжки заготовок в замковых бойках, позволяющая реализовывать интенсивную сдвиговую деформацию заготовки по всему объему металла, и предложен кузнечный инструмент для ее реализации. Данная технология показала очень хорошие результаты, которые заключались в повышении качества металла поковок [9]. Но у этой технологии имеются небольшие недостатки: она применима в основном дляковки поковок только прямоугольного сечения, а из-за имеющихся в конструкции углов возникают концентраторы растягивающих напряжений.

Поэтому данный инструмент был усовершенствован так, чтобы была возможность использовать его дляковки круглых поковок и избежать возникновения даже небольших концентраторов растягивающих напряжений. При этом конструкция данного инструмента (рис. 1) будет позволять реализовывать более значительные знакопеременные деформации по всему объему деформируемой заготовки.

Целью настоящей работы является исследование влияния угла наклона граней бойков (рис. 1), а также кинематических и температурных факторов на эволюцию микроструктуры.

Компьютерное моделирование технологического процессаковки с дополнительным макросдвигом проводили с использованием программного комплекса Deform. В качестве исходного материала была выбрана сталь 5ХВ2С. Исходная заготовка имела диаметр 45 мм. Деформацию осуществляли при температуре 1000 °С. Для моделирования был установлен неизотермический тип расчета. Вертикальная скорость движения верхнего бойка составляла 1 мм/с. При контакте заготовки с бойками значение коэффициента трения было установлено равным 0,25. На заготовке была построена абсолютная тетраэдрическая сетка, сгущенная на поверхности для лучшей отрисовки круглой формы. Минимальный размер элемента был установлен на 0,3 мм, максимальный размер – на 0,6 мм, параметры перестроения сетки были установлены по умолчанию. В ходе компьютерного моделирования было исследовано влияние такого геометрического фактора, как угол граней бойков, а также кинематических и температурных факторов на изменение микроструктуры. В качестве исходного размера зерна было принято значение 60 мкм. Были выполнены четыре цикла деформации с поворотом заготовки на 90 ° после каждого обжатия. При анализе каждой модели исследование выбранных параметров проводили на последнем цикле.

Сначала было проведено изучение влияния угла наклона плоской грани. Для этого были построены модели с углом наклона 0, 15, 30 и 45 °. При рассмотрении данных моделей, чтобы выявить наиболее рациональную конструкцию бойков, необходимо ввести критерий оптимальных значений. Был принят следующий критерий для размера зерна: «меньше-лучше».

Анализ эволюции микроструктуры (рис. 2) показал, что во всех вариантах область измельчения зерна охватывает большую часть поперечного сечения заготовки. При этом наиболее интенсивно исходное зерно измельчается и развивается в бойках с углом наклона плоской грани 0 (11 мкм) и 30 ° (13 мкм). На основании принятого критерия оптимальности размера зерна «меньше-лучше» была выявлена следующая последовательность в порядке убывания: 15 ° → 45 ° → 30 ° → 0 °. Таким образом, наиболее оптимальным вариантом будет использование бойков с углом 30°, поскольку в этом случае в заготовке возникает достаточно обширное распределение деформации по сечению (второе по охвату сечения после бойков с углом 0 °) при значительно меньшем усилии деформирования [10]. Результатом является второй по интенсивности уровень измельчения структуры металла.

Для дальнейшего анализа влияния технологических параметровковки в новых бойках на эволюцию микроструктуры было решено использовать бойки с углом наклона плоских граней 30 °. В качестве варьируемых параметров были выбраны температура нагрева металла и скорость движения пуансона, поскольку значения данных параметров легко изменять в реальных условиях. Полученная модель на рис. 3, а при температуре 1000 °С и скорости пуансона 1 мм/с была принята за базовую. В результате

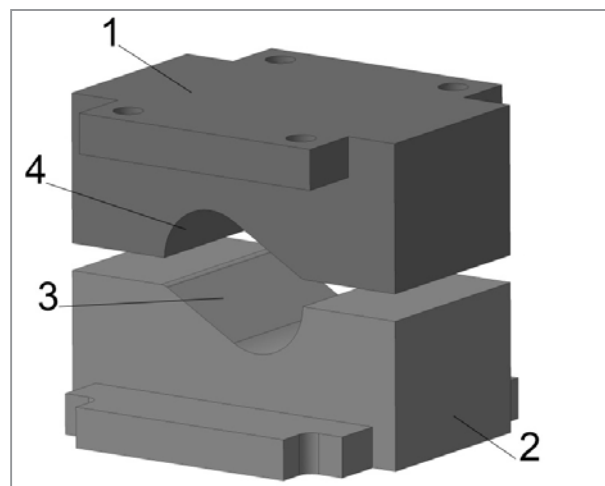


Рис. 1. Инструмент для протяжки заготовок:
1 – верхний боек; 2 – нижний боек;
3 – плоская рабочая поверхность бойка;
4 – рабочая поверхность бойка, выполненная в виде сегмента окружности

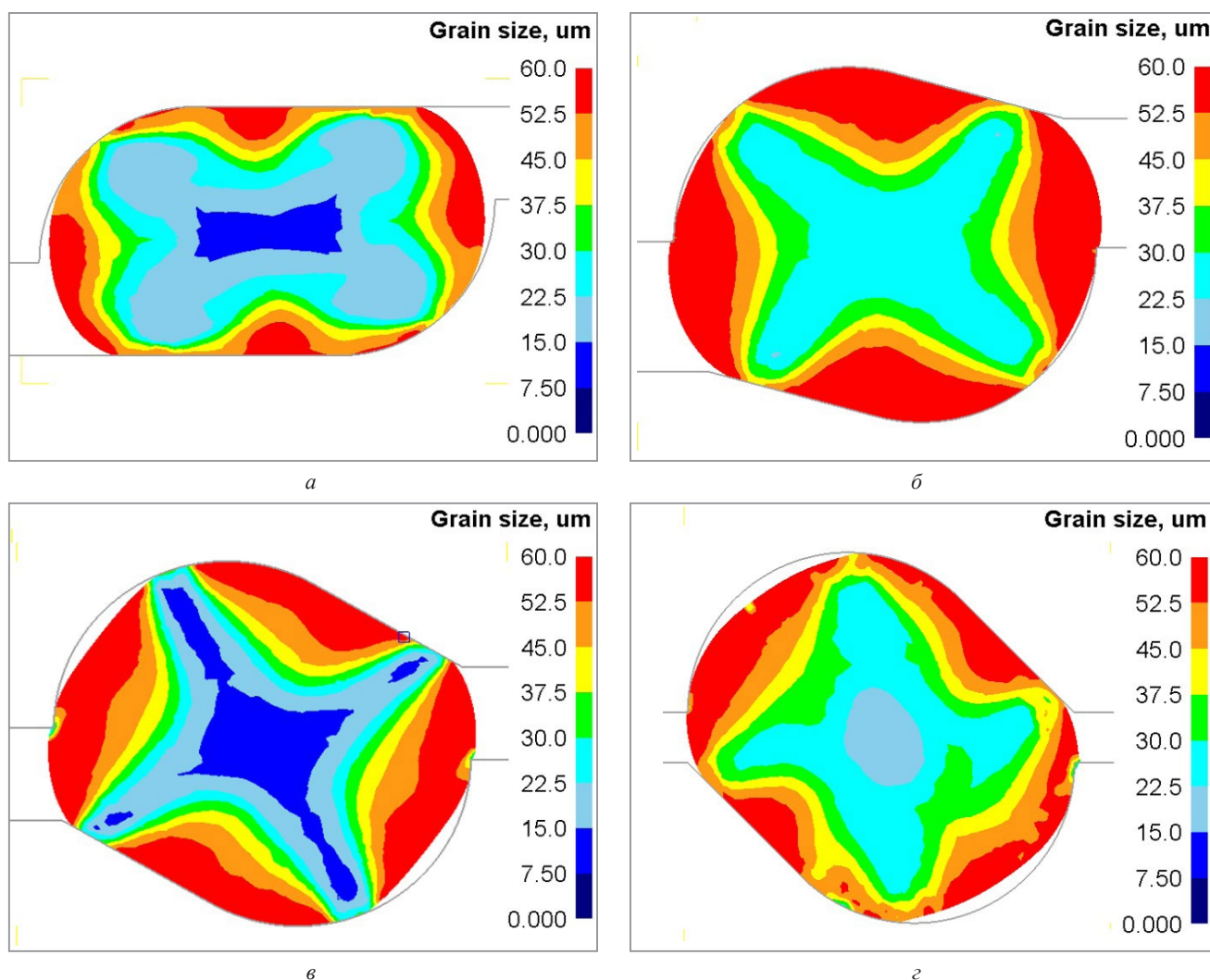


Рис. 2. Изменение размера зерна в бойках с разными углами наклона плоской грани: $a - 0^\circ$, $б - 15^\circ$, $в - 30^\circ$, $г - 45^\circ$

для изучения влияния технологических параметровковки в новых бойках на эволюцию микроструктуры были дополнительно построены следующие модели: с температурами нагрева заготовки до 1200 и 800 °С; со скоростями движения пуансона 0,1 и 10 мм/с.

На рис. 3 представлены результаты расчета изменения размера зерна при различных технологических параметрах. При рассмотрении моделей с различными значениями температуры нагрева заготовки было выявлено, что данный параметр оказывает весьма существенное влияние на интенсивность измельчения структуры. При повышении температуры нагрева до 1200 °С интенсивность измельчения зерна значительно снижается, что является результатом роста уровня статической и динамической рекристаллизации. При снижении температуры нагрева до 800 °С, напротив, интенсивность измельчения структуры существенно возрастает. Это связано с тем, что для стали 5ХВ2С температура начала рекристаллизации равна 775 °С (точка A_{C1}). Нагретая до 800 °С, заготовка постепенно остывает, минуя точку A_{C1} , в результате процессы рекристаллизации полностью подавляются.

При рассмотрении моделей с различными значениями скорости движения пуансона было выявлено, что данный параметр оказывает влияние на интенсивность измельчения структуры, хотя и не такое существенное, как температура нагрева. При повышении скорости движения пуансона до 10 мм/с интенсивность измельчения зерна снижается, а при снижении температуры нагрева до 0,1 мм/с интенсивность измельчения структуры возрастает. Данное явление также связано с процессами рекристаллизации. Интенсивность рекристаллизации зависит от величины температуры заготовки, интенсивность изменения которой зависит от скорости деформирования. При пониженной скорости движения пуансона общая длительность процесса деформирования возрастает. В результате заготовка успевает больше остыть, что сказывается на уровне измельчения зерна. При повышенной скорости деформирования интенсивность остывания заготовки снижается, что ведет к понижению уровня измельчения зерна.

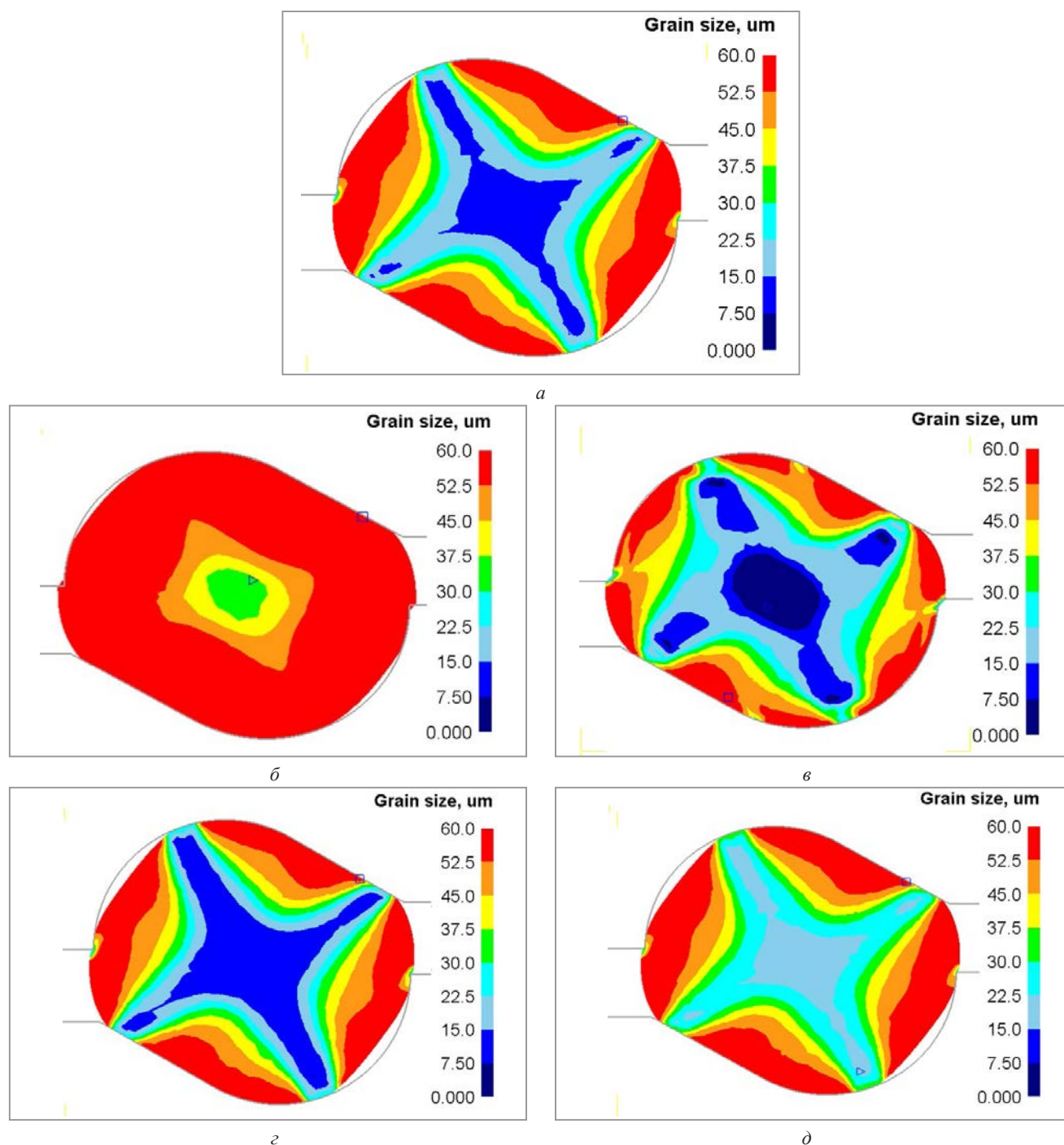


Рис. 3. Изменение размера зерна в моделях с разными технологическими параметрами: *a* – базовая модель; *б* – при 1200 °С; *в* – при 800 °С; *г* – при 0,1 мм/с; *д* – при 10 мм/с

Исходя из полученных данных, наиболее оптимальными условиями с точки зрения конечного размера зерна являются температура нагрева до 800 °С и скорость движения пуансона 0,1 мм/с. Однако для утверждения данных параметров в рассматриваемых моделях необходимо оценить возникающие усилия деформирования, поскольку данный параметр является критическим на этапе реализации разрабатываемой технологии. Данные по размеру зерна и усилию деформирования приведены в таблице.

Размер зерна и усилие деформирования в моделях с разными технологическими параметрами

Показатель	Модель				
	базовая	при 1200 °С	при 800 °С	при 0,1 мм/с	при 10 мм/с
Размер зерна, мкм	13	36	6	10	19
Усилие, кН	202	164	495	278	185

Из таблицы видно, что, несмотря на минимальный полученный размер зерна, вариант понижения температуры нагрева заготовки до 800 °С не является оптимальным, поскольку в этом случае за счет остывания и понижения пластичности металла уровень усилия возрастает почти в 2,5 раза по сравнению с базовым вариантом. В то же время все три варианта скорости движения верхнего бойка могут быть рекомендованы для реализации данного процесса на практике. Ключевым фактором выбора скорости здесь будет являться номинальная мощность прессового оборудования. При достаточном запасе прочности процесс деформирования желательнее вести на пониженных скоростях деформирования, что приведет к дополнительному измельчению исходного зерна.

Выводы

В работе представлены результаты компьютерного моделирования эволюции микроструктуры при ковке заготовок круглого сечения в бойках новой конструкции. Анализ моделей с различными углами наклона плоских граней показал, что наиболее оптимальным вариантом является использование бойков с углом 30°. Анализ влияния технологических параметров на эволюцию микроструктуры показал, что оба рассмотренных параметра (скорость движения инструмента и температура нагрева заготовки) оказывают влияние на интенсивность измельчения структуры, при этом влияние температуры нагрева более существенное. Наиболее оптимальной температурой нагрева заготовки с точки зрения размера зерна и возникающего усилия является значение 1000 °С, в то время как все три варианта скорости движения пуансона могут быть рекомендованы для реализации данного процесса на практике.

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (Грант № AP09259236).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Найзабеков А. Б.** Условия развития сдвиговых деформаций при ковке. Алматы: Гылым, 1997, 185 с.
2. **Найзабеков А. Б.** Научные и технологические основы повышения эффективности процессовковки при знакопеременных деформациях. Алматы, 2000, 336 с.
3. **Тюрин В. А.** Инновационные технологииковки с применением макросдвигов // Кузнечно-штамповочное производство. 2007. № 11. С. 15–20.
4. **Черный Б. П.** Новая технология и оборудование для радиальнойковки заготовок из благородных металлов с высокими обжатиями и дополнительными макросдвигами // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2005. № 1. С. 39–43.
5. **Богатов А. А., Нухов Д. Ш.** Разработка способа кузнечной протяжки без изменения формы и размеров исходной заготовки // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. 2015. № 4. С. 16–21.
6. **Banaszek G., Vajor T., Kawalek A., Garstka T.** Analysis of the Open Die Forging Process of the AZ91 Magnesium Alloy // Materials. 2020. Vol. 13(17). № 3873.
7. **Волокитин А. В., Толкушкин А. О., Панин Е. А., Волокитина И. Е.** Исследование закрытия внутренних дефектов заготовки при протяжке в ступенчато-клиновидных бойках // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. 2021. С. 35–36.
8. **Найзабеков А. Б., Лежнев С. Н., Булебаева А. Ж.** Исследование процесса деформирования заготовок в специальном устройстве без существенного изменения начальных размеров // Изв. вузов. Черная металлургия. 2001. № 6. С. 23–25.
9. **Найзабеков А. Б., Лежнев С. Н.** Исследование деформирования слитков в замковых бойках // Междунар. конф. «Наука и образование – ведущий фактор стратегии «Казахстан –2030». 2002. С. 132–134.
10. **Толкушкин А. О., Лежнев С. Н., Панин Е. А.** Определение оптимальных геометрических параметров нового кузнечного инструмента на основе компьютерного моделирования в программном комплексе Deform-3D // Междунар. конф. молодых ученых, магистрантов, студентов и учащихся «Родной край – основа всех начинаний поколения молодых». 2021. С. 168–173.