

Моделирование процесса изменения температурного поля заготовки из циркониевого сплава Zr–1%Nb при равноканальном угловом прессовании

Ханан Алшеих^a, А. Б. Рожнов^b, С. О. Рогачев^b, Д. З. Грабко^{a,*}, О. А. Шикимака^a

^aИнститут прикладной физики, Госуниверситет Молдовы, г. Кишинев, 2028, Молдова

^bНациональный университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, 119049, Россия

*e-mail: daria.grabco@ifa.usm.md

Поступила в редакцию 17.07.2024

После доработки 12.09.2024

Принята к публикации 17.09.2024

С использованием математического моделирования в программном комплексе QFORM получены распределение температуры заготовки из циркониевого сплава Э110 (Zr1%Nb) в ее продольных и поперечных сечениях в процессе равноканального углового прессования (РКУП). Приведены исходные данные по геометрическим параметрам заготовки и матрицы РКУП-установки, описаны условия проведения процесса интенсивной пластической деформации, химический состав и физические характеристики сплава Э110, необходимые для расчетного моделирования. Температуры заготовки определены для расчетных моментов прохождения мест стыка каналов матрицы, которые соответствуют 25, 50 и 75% ее длины. Показано, что в процессе РКУП при данной скорости в сечении, соответствующем стыку каналов матрицы, происходит повышение температуры заготовки относительно ее начального разогрева на величину порядка 10 °С.

Ключевые слова: циркониевый сплав, РКУП, математическое моделирование, программный комплекс QFORM, температура заготовки

УДК 538.9:538.951

<https://doi.org/10.52577/eom.2024.60.5.31>

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к изучению циркониевых сплавов проявился более полувека тому назад, когда было установлено, что цирконий и его сплавы являются перспективным материалом для атомной энергетики благодаря таким характеристикам, как высокая температура плавления, коррозионная и радиационная стойкость. При этом несомненным достоинством циркониевых сплавов для этой области применения является малая величина сечения захвата (поглощения) тепловых нейтронов [1, 2]. Ряд других важных физико-механических и технологических свойств циркония и его сплавов, таких как высокая коррозионная стойкость, устойчивость к воздействию биологических сред, биосовместимость, расширили его применение и в других областях, в частности, в медицине в качестве костных, суставных, зубных протезов, а также хирургических инструментов [3–5].

Успешное применение циркониевых сплавов, как и любых конструкционных материалов, требует повышения уровня функциональных характеристик, таких как электропроводность, теплопроводность и т.д. Кроме того, важную роль играют различные механические характеристики: предел прочности, предел текучести,

относительное удлинение, усталостная прочность, твердость и др. Известно, что существенное улучшение этих характеристик может быть достигнуто за счет получения ультрамелкозернистой структуры при использовании воздействия на заготовку различных методов больших пластических деформаций [6–13]. Одним из таких методов является равноканальное угловое прессование (РКУП) [14–19].

До недавнего времени большинство исследований влияния процесса РКУП на механические и функциональные характеристики материалов осуществлялось путем проведения сравнительных (до и после РКУП) экспериментов по определению этих характеристик. При этом непосредственно процесс деформирования заготовки в ходе РКУП и изменение ее температурных, напряженно-деформированных полей изучались редко. Поэтому для отработки деформационно-термических режимов РКУП часто требовались дополнительные эксперименты. Развитие вычислительных мощностей компьютерной техники и соответствующего программного обеспечения, в частности, основанного на применении метода конечных элементов (ANSYS, QFORM, Deform, Multidef и др.), позволило расширить круг решаемых задач исследований. В число таких задач попали

вопросы, связанные с изучением процессов, протекающих при осуществлении РКУП [20–27].

Новый подход позволил сократить количество экспериментов и предоставил информацию, поясняющую тот или иной конечный результат. Так, в работе [28] проводили численный анализ теплопередачи и пластической деформации при РКУП алюминиевого сплава и стали. При этом рассматривались три уровня скорости прессования: 0,18; 1,8 и 18 мм/с. Исследованы распределения температуры и пластической деформации в заготовке, в результате чего было показано, что наиболее сильное влияние на повышение температуры заготовки оказывает скорость прессования. В работе [29] рассматривали влияние угла наклона матрицы РКУП на напряженно-деформированное состояние и изменение температуры заготовки. Моделирование было реализовано для IF-сталей в программном продукте DEFORM. Установлено, что наибольшие значения усилий деформации и температуры достигаются при угле между каналами 90° . С увеличением угла между каналами значение эффективной деформации и температуры уменьшается. В то же время изменение температурных и напряженно-деформированных полей заготовок из циркониевых сплавов в ходе РКУП ранее подробно не изучалось, хотя есть результаты моделирования для иных материалов, таких как титан [30].

В целом, применение современных методов расчетного моделирования обработки металлов давлением позволяет определять изменение характеристик обрабатываемых материалов с достаточно высокой точностью в процессе деформирования, что дает возможность использовать более оптимальные режимы деформации и сократить число натуральных экспериментов, необходимых для этого. Цель настоящей работы – изучение изменения температуры в различных сечениях заготовки из циркониевого сплава Э110 при проведении РКУП с помощью методов расчетного моделирования.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

1. Исходные данные для расчетного моделирования

В работе методом РКУП обрабатывались прутки сплава Э110 длиной 100 мм и диаметром 20 мм. Прутки были изготовлены и поставлены АО «Чепецкий механический завод» (г. Глазов, Россия). В исходном состоянии сплав был частично рекристаллизованным. Процесс РКУП, моделирование которого осуществляли в настоящей работе, представлял собой шесть последовательных проходов заготовки через матрицу по

маршруту B_c . Угол между каналами матрицы РКУП составлял 108° . РКУП осуществляли в изотермических условиях со ступенчатым понижением температуры по следующему режиму: два прохода при $T = 420^\circ\text{C}$ + два прохода при $T = 350^\circ\text{C}$ + два прохода при $T = 300^\circ\text{C}$. Объем исходных данных для моделирования складывался из следующих составляющих:

- геометрические параметры технологической оснастки (матрица РКУП) и заготовки;
- характеристики материалов оснастки и заготовки.

2. *Геометрические параметры оснастки и заготовки.* Для построения конечно-разностных моделей элементов оснастки и заготовки были использованы возможности программы Компас 3Д. Данная программа ориентирована на формирование трехмерных моделей деталей. При этом используются одно-, двух- и трехмерные конечные элементы. На рис. 1 представлены модели заготовки, пуансона, матрицы, сборки и их размеры. Количество объемных конечных элементов в сетке заготовки составляло 46795 шт., а количество конечных объемных элементов в сетке оснастки – 55693 шт.

3. *Характеристики материалов оснастки и заготовки.* Для осуществления расчетного моделирования необходимо введение в программу DEFORM данных о физических и механических свойствах материала заготовки и оснастки. Данные о материале заготовки – сплаве Э110 – частично были получены из справочников (физические свойства), а частично путем проведения механических испытаний образцов (механические свойства на растяжение и сжатие). Химический состав сплава Э110 приведен в табл. 1.

Комплекс физических характеристик сплава Э110, использованных для моделирования, представлен в табл. 2 [31].

Также к исходным данным для численного моделирования следует отнести механические характеристики материала, которые были определены следующим образом. Для построения диаграммы деформации при растяжении использовалась универсальная испытательная машина Instron 5966. Испытания проводили при комнатной температуре. Скорость движения захватов составляла 1 мм/мин. Форма образцов, требования к испытательному оборудованию и методики определяемых величин соответствуют ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение». С целью определения влияния РКУП на механические характеристики сплава Э110 при растяжении были проведены испытания четырех образцов. Для этого два образца были испытаны в исходном состоянии и

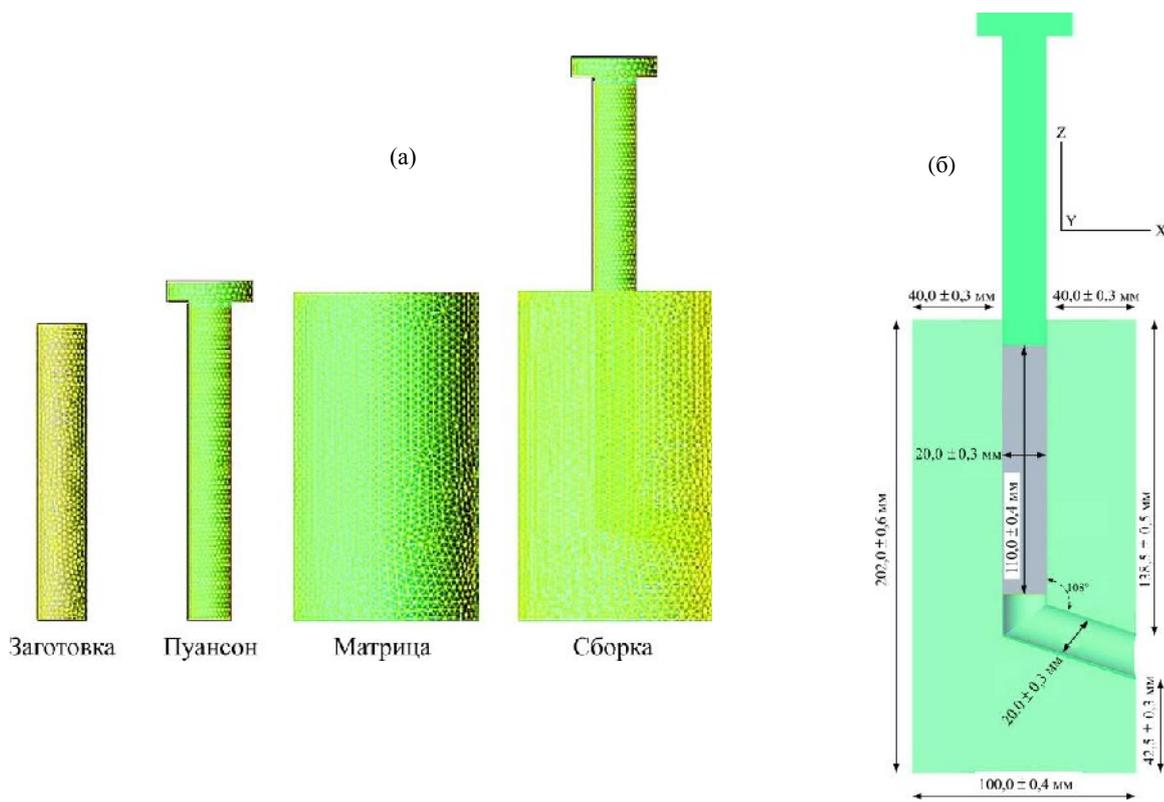


Рис. 1. Трехмерные модели заготовки, деталей оснастки, сборки (а) и их размеры (б).

Таблица 1. Химический состав сплава Э110

Содержание элемента, %								
Nb	Fe	Ni	Al	Ti	C	Si	O	N
0,9-1,1	0,050	0,020	0,008	0,005	0,020	0,020	0,100	0,006

Таблица 2. Физические характеристики сплава Э110 [31]

T, °C	20	100	200	300	400	500
Теплопроводность, Вт/(м×К)	17,2	18	19,3	20	20,5	20,9
Теплоемкость, Дж/(кг×К)	–	285	301	322	343	398
Коэффициент линейного термического расширения, $\alpha \times 10^6, K^{-1}$	5,8	6,0	6,2	6,3	6,4	6,6
Плотность $\rho, \text{кг/м}^3$	6550	–	–	–	–	–
Модуль Юнга E, МПа	95628	–	–	–	–	–
Коэффициент Пуассона ν	0,38	–	–	–	–	–

два образца после обработки РКУП. Полученные диаграммы деформации (по одному образцу для каждого состояния) представлены на рис. 2. Для моделирования была использована диаграмма деформации сплава Э110, полученная при растяжении образца до РКУП.

Из полученных диаграмм были определены механические характеристики сплава Э110 – предел текучести $\sigma_{0,2}$, предел прочности σ_B и относительное удлинение при разрушении δ , которые приведены для каждого испытанного образца в табл. 3. Там же указаны средние значения механических характеристик для каждого состояния материала.

Как показывают данные, представленные в табл. 3, обработка РКУП сплава Э110 привела к повышению значений прочностных характеристик при растяжении $\sigma_{0,2}$ и σ_B на 22 и 40%

соответственно. Одновременно наблюдается уменьшение пластичности материала (δ) практически в 2 раза. Диаграммы напряжение/деформация сплава Э110 при сжатии необходимы для моделирования процесса РКУП в программной среде QFORM. Образцы и испытательное оборудование соответствовали требованиям ГОСТ 25.503-97 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие». При планировании экспериментов учтено, что технологический процесс РКУП осуществляется при четырех температурах заготовки (420°, 400°, 350° и 300 °C). Соответственно, для корректного моделирования технологического процесса требуются диаграммы деформации для всех четырех температур.

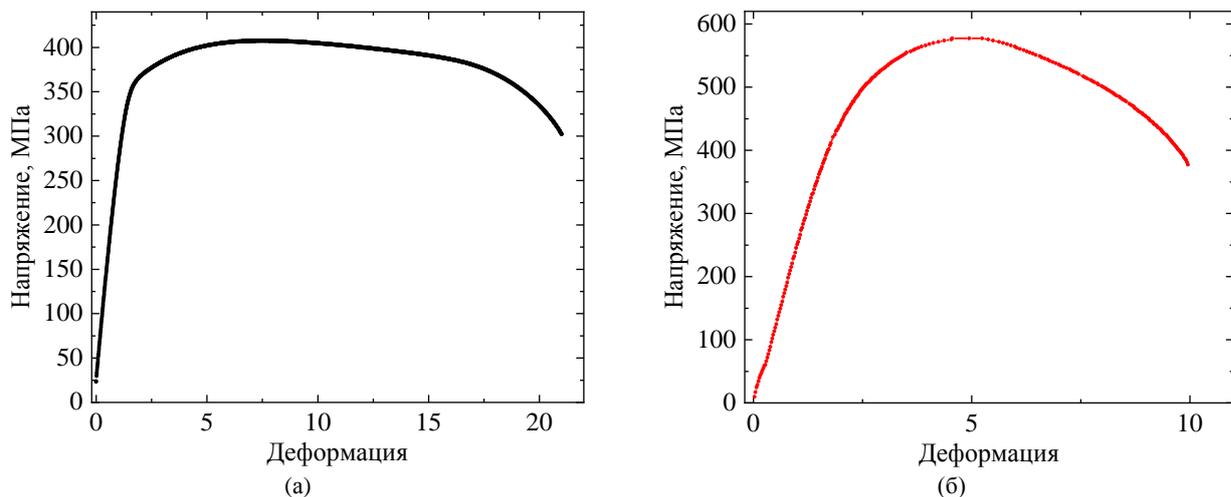


Рис. 2. Диаграммы деформации образцов из сплава Э110 на растяжение в исходном состоянии (а) и после РКУП (б).

Таблица 3. Механические характеристики сплава Э110 при растяжении

№ образца	Физико-механические характеристики		
	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %
Состояние поставки			
1	336	434	18,9
2	312	407	21,4
Среднее значение	324	420	20,2
После обработки РКУП			
1	374	597	12,0
2	419	578	9,5
Среднее значение	398	588	10,8

Решение данной задачи было осуществлено с привлечением испытательного комплекса Gleeble System 3800. Из всего многообразия возможностей этого комплекса были использованы модуль нагрузки Load Unit и сменный модуль Hydrowedge II, обеспечивающий высокотемпературные условия проведения нагружения [32]. Нагрев образцов осуществлялся при пропускании тока, для контроля температуры предусмотрена установка термопары на образец. На рис. 3а показан внешний вид комплекса Gleeble System 3800, а на рис. 3б – нагретый образец с термопарой.

Образцы для данных испытаний и требования к испытательному оборудованию соответствовали ГОСТ 25.503-97 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие». Полученные диаграммы деформации сплава Э110 на сжатие представлены на рис. 4. При описании свойств материала оснастки были использованы сведения, заложенные в базу данных QFORM, опция «Высокопрочный сплав».

Как следует из рис. 4, кривые напряжение/деформация проявляют немонотонную

зависимость от температуры испытания. Наибольшие напряжения создаются при наименьшей температуре испытания (300 °С), а наименьшие – при наибольшей температуре испытания (420 °С). Промежуточные напряжения проявляются при средних температурах, однако при 400 °С на конечной стадии напряжение выше, чем при 350 °С.

ПРОВЕДЕНИЕ РАСЧЕТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Общий алгоритм моделирования РКУП. В программе была использована опция «Добавить новую операцию». Это позволило моделировать состояние заготовки, совершившей первый проход РКУП, и переходить ко второму проходу РКУП в оснастке, состояние которой учитывало изменения, вносимые первым проходом. Так было сделано для всех шести проходов. Кроме того, данная опция позволила имитировать поворот заготовки на 90° после каждого прохода, что соответствовало маршруту B_C .

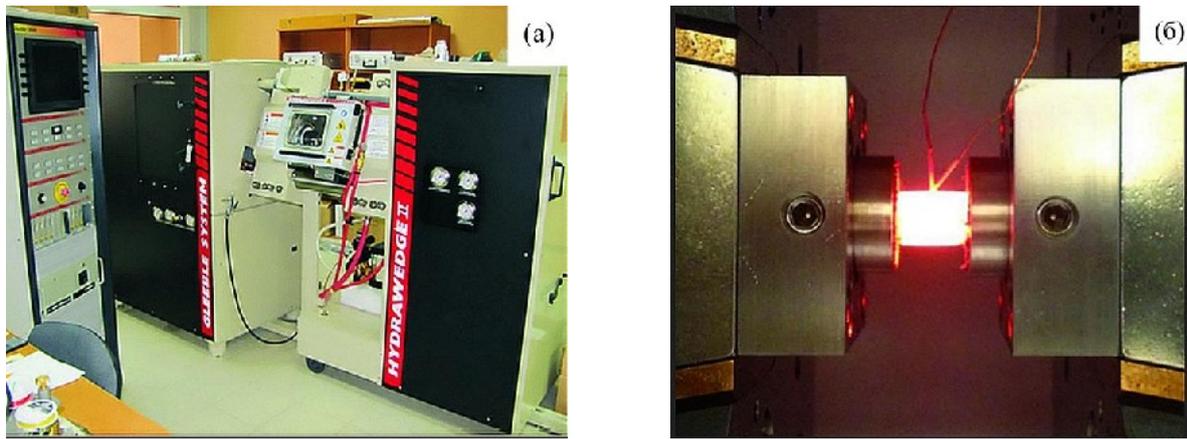


Рис. 3. Комплекс Gleeble System 3800 (а) и нагретый образец (б).

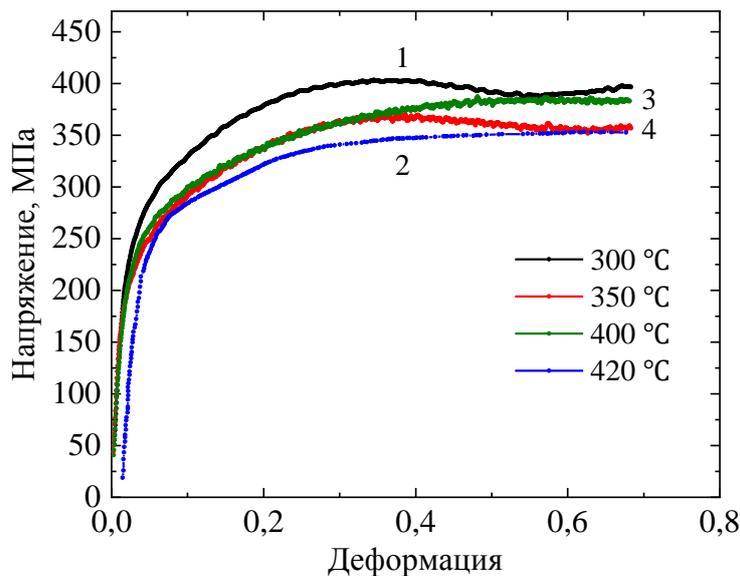


Рис. 4. Диаграммы деформации сплава Э110 при сжатии (σ/ϵ).

Температура заготовки и оснастки. При проведении численного моделирования были использованы одинаковые уровни температуры разогрева заготовки и оснастки. А именно: первый и второй проходы – 420 °С; третий и четвертый проходы – 350 °С; пятый и шестой проходы – 300 °С.

Расчет. При проведении расчетного моделирования с помощью программы QFORM рассчитывались следующие величины на различных этапах технологического процесса воздействия РКУП на цилиндрическую заготовку из циркониевого сплава Э110:

- температура образца с учетом предварительного нагрева заготовки;
- пластическая деформация заготовки;
- интенсивность напряжений в заготовке;
- среднее напряжение в заготовке.

В данной статье будут изложены результаты по определению изменений температуры заготовки в процессе РКУП. Возможности программы QFORM позволяют проводить расчеты для любой точки заготовки. С целью сокращения расчетных объемов данных и упро-

щения описания привязки к конкретным зонам заготовки были использованы некоторые условные подходы к определению областей расчетов.

На рис. 5 показаны верхняя и нижняя поверхности заготовки, а также ее продольные сечения. Причем та часть заготовки, которая проходит через точку O (рис. 5а), относится к верхней поверхности. Соответственно, часть поверхности заготовки, проходящая через точку O_1 , – к нижней поверхности. Продольные сечения заготовки – два диаметральных сечения в выбранной системе координат (рис. 5в,г). Причем в ходе моделирования технологического процесса эти сечения будут прямоугольными до и после прохождения линии контакта каналов $O-O_1$. В процессе прохождения заготовки через данную линию эти сечения будут состоять из двух частей.

Следующая категория расчетных сечений заготовки, которые в основном не рассматриваются при анализе распределений определяемых величин, – круглые и эллипсоидные поперечные сечения заготовки. На рис. 6а,б показаны круглые сечения (вид спереди и сверху

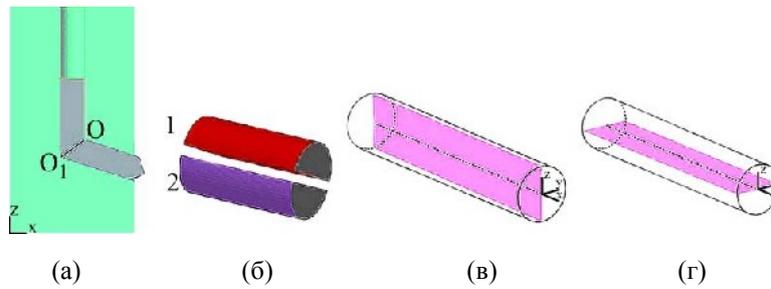


Рис. 5. Поверхности и продольные сечения заготовки.

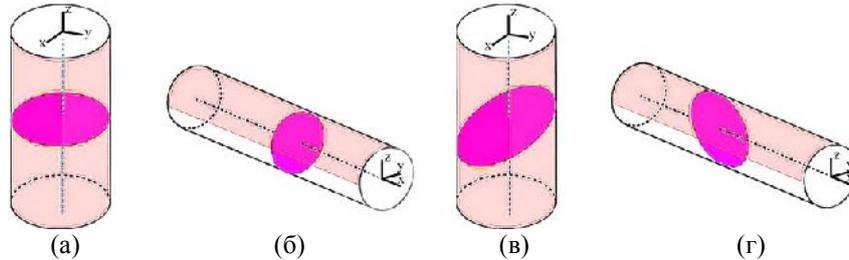


Рис. 6. Поперечные сечения заготовки.

соответственно). Аналогичные наклонные (эллипсоидные) сечения показаны на рис. 6в,г.

Абсолютное значение скорости деформирования (скорости движения инструмента) составило 0,42 мм/с (25 мм/мин). Процесс деформирования заготовки рассматривается в различные моменты ее прохождения через матрицу, точнее через зону соединения каналов. Рассмотрены четыре положения заготовки:

- момент времени t_1 , соответствующий начальной стадии прохождения заготовки (25% от длины заготовки прошло через зону стыка каналов матрицы РКУП);
- моменты времени t_2 и t_3 , соответствующие промежуточной стадии прохождения заготовки (50 и 75% соответственно);
- момент времени t_4 , соответствующий завершающей стадии прохождения заготовки (100%).

Данные моменты прохождения заготовки и рассматриваемые круглые поперечные сечения показаны на рис. 7 ((а) – t_1 ; (б) – t_2 ; (в) – t_3 и (г) – t_4).

Координаты расположения поперечных сечений привязаны к положению заготовки в различные моменты ее прохождения по оснастке, а именно:

- сечение А – расстояние 10 мм от верхнего края заготовки в момент времени t_1 ;
- сечение В – расстояние 5 мм до зоны деформирования;
- сечение С – зона деформирования (место стыка каналов);
- сечение D – расстояние 5 мм после прохождения зоны деформирования;
- сечение E – расстояние 10 мм до выхода образца из матрицы.

В табл. 4 приведены обозначения круглых и эллипсоидных поперечных сечений в различные моменты времени прохождения заготовки.

Таким образом, в общей сложности были получены девять поперечных круглых сечений – четыре до зоны деформирования и пять после ее прохождения. Площадь этих поперечных круглых сечений составляет от 306 до 312 мм². Три поперечных эллипсоидных сечения получили при наклоне секущей плоскости под углом 54° в зоне деформации (место пересечения двух каналов с равными диаметрами). Эллипсоидные сечения обозначаются буквами $C(t_1)$ (на начальной стадии), $C(t_2)$ (на промежуточной стадии) и $C(t_3)$ (на завершающей стадии). Площади эллипсоидных поперечных сечений составляли от 340 до 350 мм². Данные поперечные эллипсоидные сечения наглядно показывают изменения на плоскости в очаге сдвиговой деформации. Изменения величин площадей круглых и эллипсоидных поперечных сечений связаны с деформациями заготовки, а следовательно, и самих сечений в процессе РКУП. Величины площадей продольных сечений заготовки в разные моменты прохождения оснастки в процессе РКУП $R(t_1)$, $R(t_2)$ и $R(t_3)$ (см. рис. 7, выделено серым цветом) лежат в пределах от 2200 до 2211 мм². На завершающей стадии площадь продольной плоскости $R(t_4)$ равна 2301 мм². Горизонтальное положение плоскости $R(t_4)$ образуется при ее повороте на угол 18° против часовой стрелки $(108-90) = 18^\circ$.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 8 показаны шкала изменения температуры заготовки, ее распределение вдоль продольного сечения, максимальные (T_{\max}) и

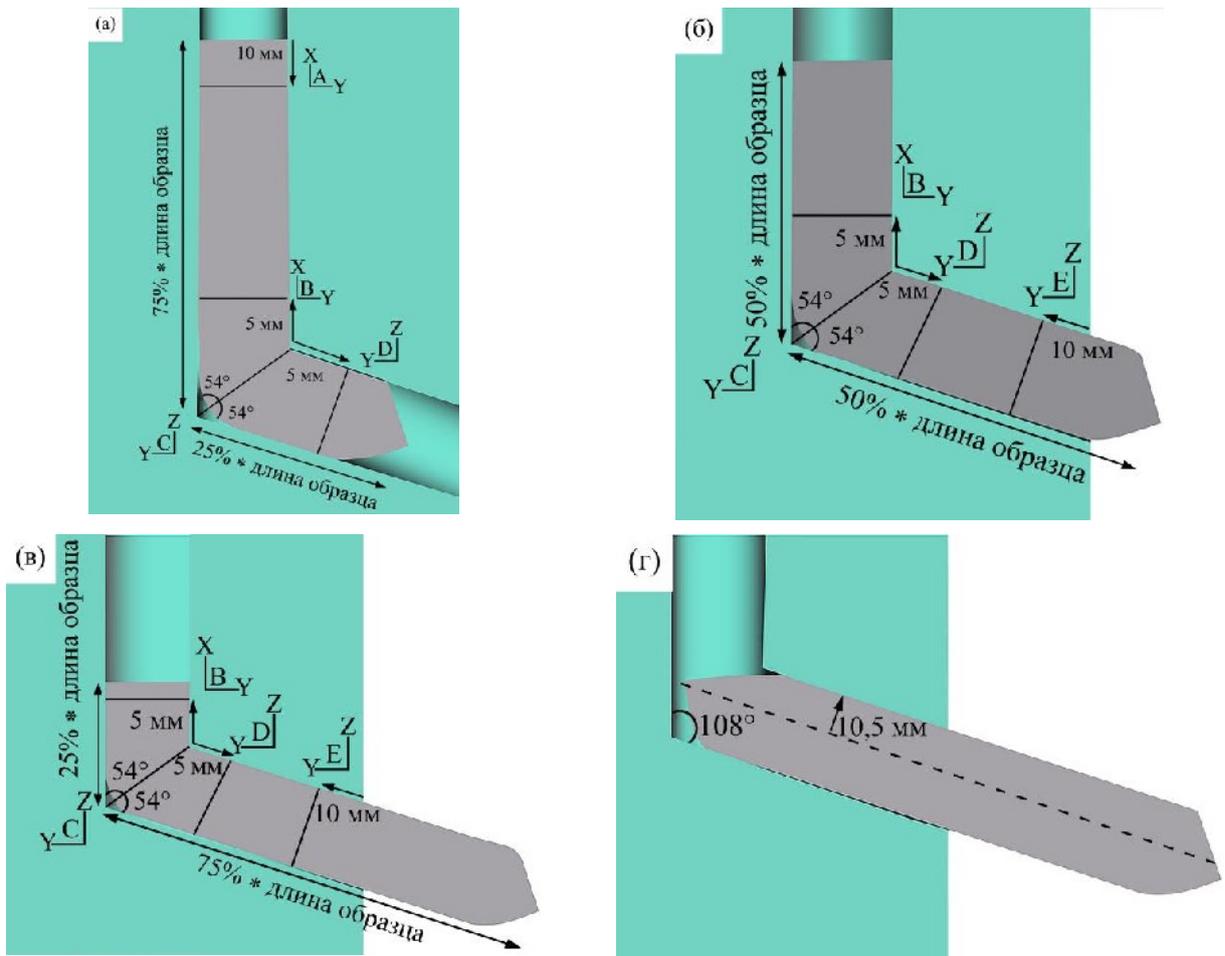


Рис. 7. Стадии прохождения заготовки при РКУП.

Таблица 4. Обозначения поперечных сечений заготовки

Время	Сечения				
	t_1	$A(t_1)$	$B(t_1)$	$C(t_1)$	$D(t_1)$
t_2	–	$B(t_2)$	$C(t_2)$	$D(t_2)$	$E(t_2)$
t_3	–	$B(t_3)$	$C(t_3)$	$D(t_3)$	$E(t_3)$
t_4	–	–	–	–	–

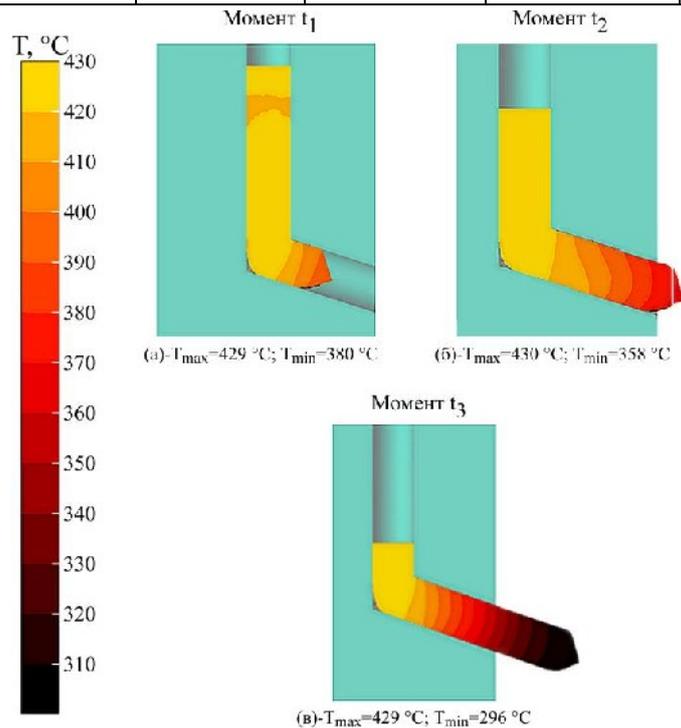


Рис. 8. Распределение температуры вдоль продольного сечения заготовки.

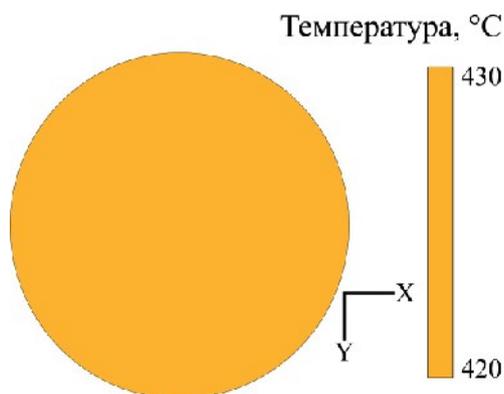


Рис. 9. Распределение температуры в поперечном сечении $A(t_1)$.

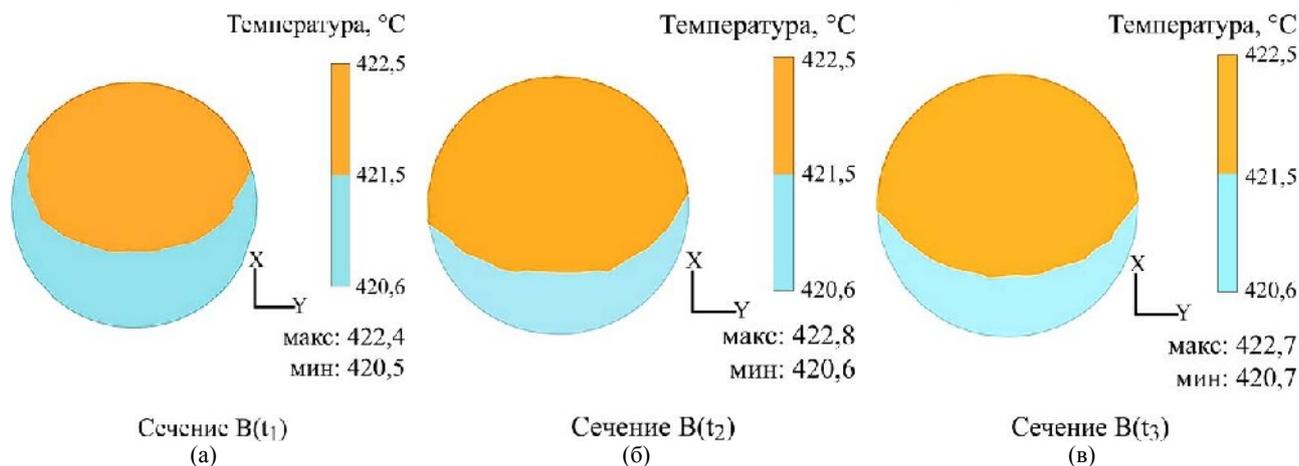


Рис. 10. Распределение температуры по сечению B .

минимальные (T_{\min}) значения температуры в разные моменты деформирования заготовки.

Необходимо отметить два следующих обстоятельства, которые оказывают влияние на процесс формирования общей картины распределения температуры заготовки вдоль ее продольного сечения. Так, во всех рассматриваемых моментах деформирования (t_1 , t_2 и t_3) отчетливо фиксируется факт образования зоны с повышенной температурой на месте пересечения каналов, то есть в зоне сдвиговой деформации. Температура заготовки в этой зоне находится в пределах от 429 °С до 430 °С. Другими словами, зона сдвиговой деформации выступает в роли теплового источника.

Из зоны с повышенной температурой тепло распространяется в обе стороны заготовки, имеющие меньшую температуру. При этом в промежуточный момент t_3 для верхней части заготовки (25% от общего объема) повышение температуры оказывает более сильное влияние на перенос тепла, чем для части заготовки (75% от общего объема), уже прошедшей зону стыка каналов (см. рис. 8в).

Второй момент в распределении температуры заготовки вдоль продольного сечения связан с наличием зоны (правый конец заготовки) с пониженной до 380 °С температурой уже в начальный момент t_1 . При дальнейшем деформировании (моменты t_2 и t_3) разница между макси-

мальной и минимальной температурами заготовки только увеличивается. Наиболее вероятной причиной такого достаточно резкого снижения температуры заготовки уже в момент t_1 может служить процесс выхода заготовки из оснастки (охлаждение воздухом через канал и далее при выходе из канала). Таким образом, при прохождении заготовки по каналам оснастки в процессе РКУП по ее длине реализуется градиент температуры.

Распределение температуры заготовки вдоль ее продольного сечения в процессе РКУП дополняется распределением температуры в поперечных круглых и эллипсоидных сечениях. Первой такой точкой является сечение $A(t_1)$ (рис. 9). Это сечение расположено на расстоянии 10 мм от верхнего края заготовки. Расчет показывает равномерный разогрев данного поперечного сечения до температуры 420 °С, то есть совпадающей с температурой предварительного нагрева заготовки и оснастки.

Следующее сечение – сечение B , которое расположено в 5 мм от зоны максимального деформирования, то есть от зоны стыка входного и выходного каналов. На рис. 10 показано распределение температуры в поперечном сечении B . Из рис. 10 видны две области распределения температуры по сечению.

Первая область (желтый цвет) имеет температуру от 421,5 °С до 422,5 °С, температура второй

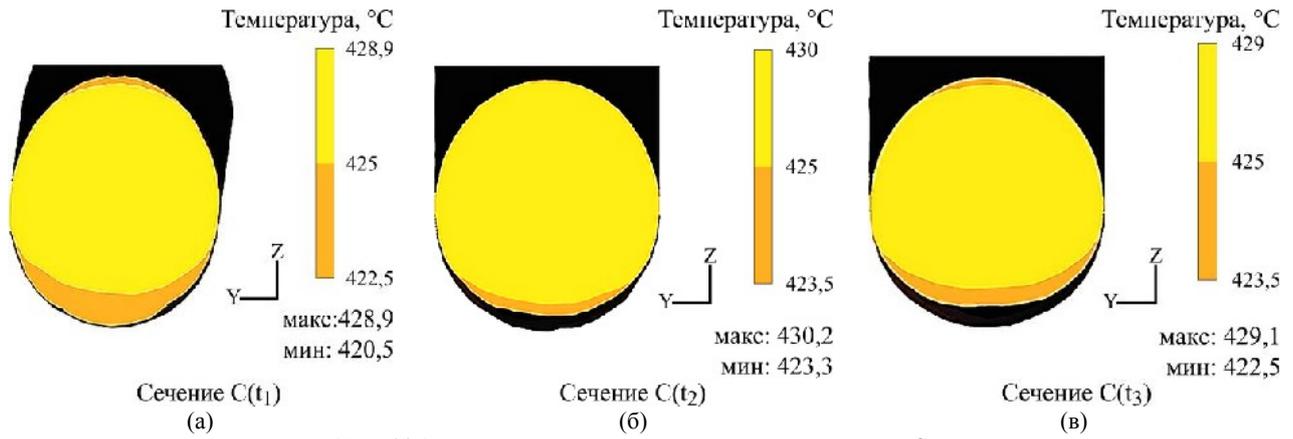


Рис. 11. Результаты расчетов температуры по сечению C .

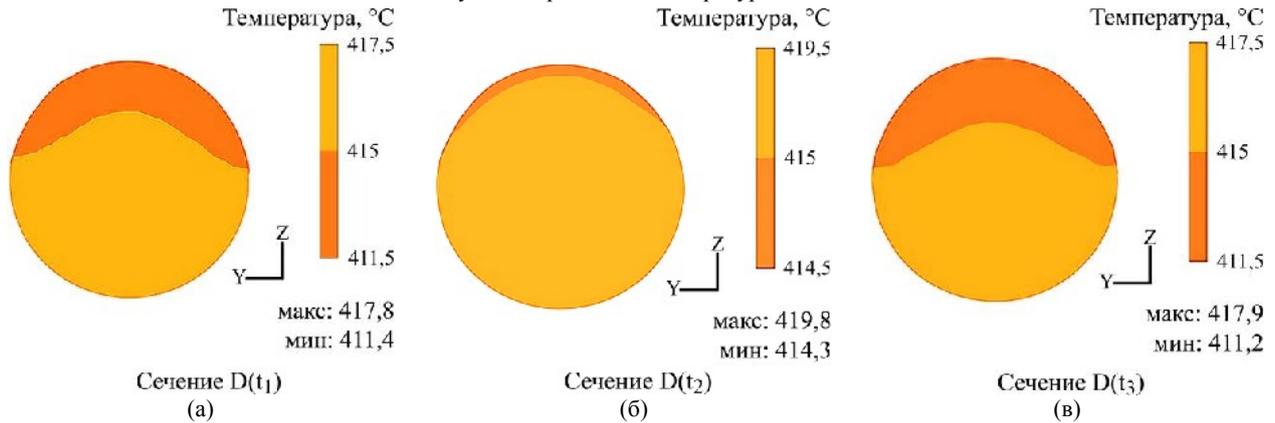


Рис. 12. Результаты расчетов температуры по сечению D .

чуть ниже (голубой цвет) – от $420,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $421,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом доля площади сечения с повышенной температурой достаточно резко изменяется в разные моменты деформирования заготовки. Для момента t_1 она составляет 62%, а для t_2 и t_3 она практически постоянна и равна 70 и 69% соответственно. Таким образом, максимальная температура в сечении B реализуется на верхнем полюсе и составляет $422,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. На нижнем полюсе температура немного выше температуры предварительного нагрева заготовки и равна $420,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. В целом разница температур в $1\text{--}2^{\circ}$ является несущественной. Температурное поле в зоне максимального деформирования описывается распределением температуры по поверхности эллипсоидных сечений $C(t_1)$, $C(t_2)$ и $C(t_3)$, которое представлено на рис. 11.

В зоне деформации на эллипсоидных поперечных сечениях $C(t_1)$, $C(t_2)$ и $C(t_3)$ температура понижается при перемещении от центра вдоль осей Z и Y до края. Явно выделяются две кольцевые зоны с пониженной температурой $422\text{--}425\text{ }^{\circ}\text{C}$ и центральная зона с повышенной температурой $425\text{--}430\text{ }^{\circ}\text{C}$. Максимальная температура в сечении C реализуется в момент t_2 и равна $430\text{ }^{\circ}\text{C}$. В моменты t_1 и t_3 максимальная температура составляет $428,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $429,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, соответственно. Зона максимальной темпера-

туры (центральная зона) занимает 83; 92 и 86% от общей площади сечения в моменты t_1 , t_2 и t_3 , соответственно. Полученные результаты целесообразно сравнить с результатами моделирования процесса РКУП титана, который, как и цирконий, является труднодеформируемым ГПУ-металлом. Видно, что обнаруженный прирост температуры ($\sim 10^{\circ}\text{C}$) для сплава Э110 сопоставим с полученным приростом температуры для титана в близких условиях: скорость прессования 1 мм/с и температура прохода $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ [30].

После прохождения зоны максимального деформирования заготовки на расстоянии 5 мм от нее температура на круглых поперечных сечениях D понижается до $411\text{--}420\text{ }^{\circ}\text{C}$, как показано на рис. 12.

Температура понижается при перемещении вдоль оси Z от верхнего полюса вниз с $418\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $411\text{ }^{\circ}\text{C}$ на сечениях $D(t_1)$ и $D(t_3)$ и с $420\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $414\text{ }^{\circ}\text{C}$ на сечении $D(t_2)$. Минимальная скорость изменения (уменьшения) температуры фиксируется для центральной части сечения $D(t_2)$. Зона с повышенной температурой $416,5\text{--}420\text{ }^{\circ}\text{C}$ в нижней части сечения D занимает площадь 68; 96 и 65% соответственно сечениям $D(t_1)$, $D(t_2)$ и $D(t_3)$. Зона с пониженной температурой $411\text{--}416,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ расположена на верхней части сечений $D(t_1)$, $D(t_2)$ и $D(t_3)$ и занимает площадь 32; 4 и 35% соответственно (рис. 12).

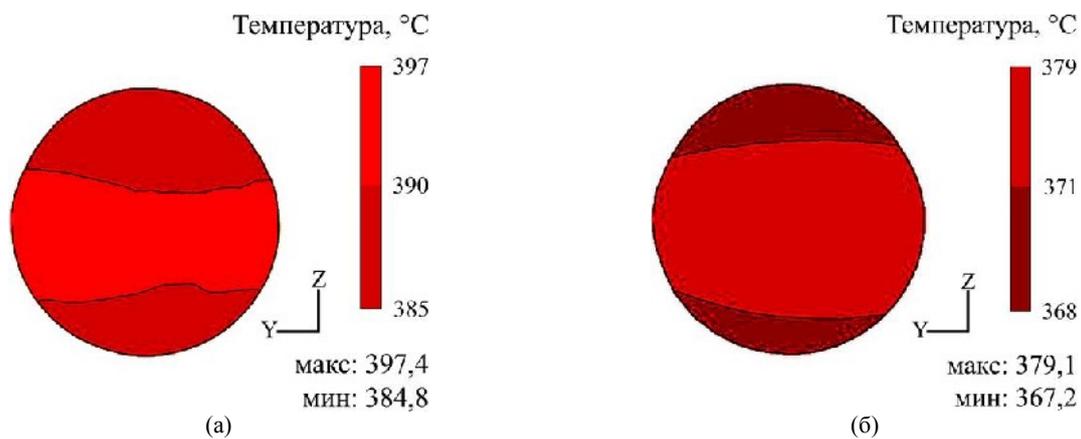


Рис. 13. Результаты расчетов температуры по сечению $E(t_2)$ – (а) и сечению $E(t_3)$ – (б).

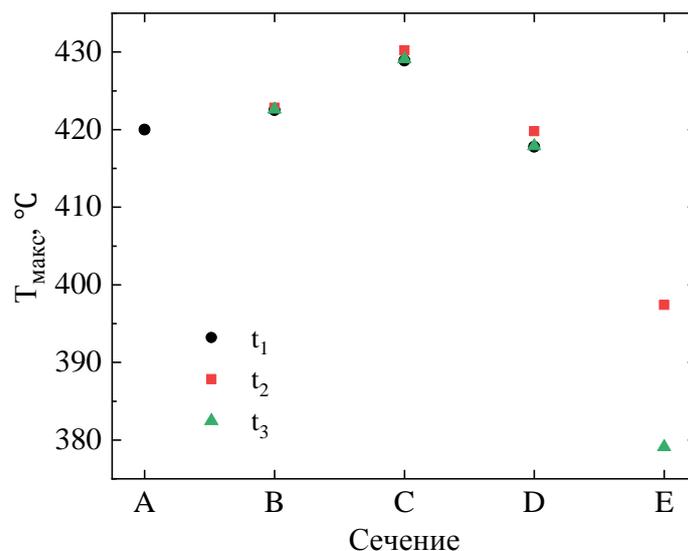


Рис. 14. Распределение T_{\max} по длине заготовки.

Для заготовки, подошедшей к краю оснастки (расстояние 10 мм), выделяются три основные зоны значений температуры на промежуточной (рис. 13а) и завершающей стадии первого прохода РКУП (рис. 13б).

Центральные зоны с повышенной температурой 390–397 °С в сечении $E(t_2)$ (рис. 13а) занимают площадь 50% и с температурой 371–379 °С в сечении $E(t_3)$ (рис. 13б) – площадь 57%. Они находятся между двух зон с низкой температурой 385–390 °С с площадью 50% на верхней и нижней части сечения $E(t_2)$ и 367–371 °С с площадью 43% на сечении $E(t_3)$. Температура понижается при перемещении вдоль оси Z от центра до края и повышается вдоль оси Y только в центральной зоне. Наличие полюсных зон с пониженной температурой, окружающих зону более горячего металла, по всей видимости, связано с процессом остывания заготовки, который начинается именно с наружной поверхности.

В момент времени t_4 все сечения прошли контрольные точки, поэтому температуры в этот момент времени не определялись. На рис. 14 представлена графическая интерпретация изме-

нения максимальной температуры по длине заготовки (разные сечения). Расстояния между сечениями взяты произвольно, поскольку анализируется общая тенденция изменения максимальной температуры. Расчетные значения максимальной температуры отмечены точками.

Из рис. 14 видно, что температура заготовки увеличивается от уровня предварительного нагрева (сечение A) до наибольшего значения в зоне деформирования (сечение C) и далее уменьшается до последующего остывания заготовки (сечение E).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведено расчетное моделирование в программном комплексе QFORM температурных полей заготовки из циркониевого сплава Э110 в процессе обработки РКУП. Моделирование проведено на основе характеристик сплава Э110, включающих химический состав, диаграммы деформирования сплава при растяжении и сжатии, механические и физические свойства.

2. Описано полученное в результате расчетов распределение температуры заготовки в процессе первого прохода РКУП при

температуре 420 °С. Показано, что имеется градиент температуры как в продольных, так и в поперечных сечениях заготовки.

3. Максимальная температура заготовки достигается в зоне наибольшей деформации и превышает начальный разогрев примерно на 10 °С, что является достаточно небольшой величиной и не должно оказывать существенного влияния на процессы деформации и структурно-фазовых превращений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данное исследование было поддержано исследовательской субпрограммой 011201 Института прикладной физики Государственного университета Молдовы и финансируется Министерством образования и научных исследований Республики Молдова.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них отсутствует конфликт интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Coleman, C.E., *The Metallurgy of Zirconium*, Vienna: International Atomic Energy Agency, 2022.
- Lemaignan, C., *Zirconium alloys: properties and characteristics*. In: Vol. 2. Material Properties/Oxide Fuels for Light Water Reactors and Fast Neutron Reactors, Konings, J.M.R., Ed., Elsevier, 2012. p. 217. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-056033-5.00015-X>
- Rosalbino, F., Macciò, D., Giannoni, P., Quarto, R., et al., Study of the in vitro corrosion behavior and biocompatibility of Zr-2.5Nb and Zr-1.5Nb-1Ta (at %) crystalline alloys, *J. Mater. Sci: Mater. Med.*, 2011, vol. 22, p. 1293. <https://doi.org/10.1007/s10856-011-4301-z>
- Mehjabeen, A., Song, T., Xu, W., Ping Tang, H., et al., Zirconium alloys for orthopedic and dental applications, *Adv. Eng. Mater.*, 2018, vol. 20, art. ID 1800207. <https://doi.org/10.1002/adem.201800207>
- Niinomi, M., Narushima, T. and Nakai, M., *Advances in Metallic Biomaterials*. Heidelberg: Springer, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46836-4>
- Eroshenko, A.Yu., Mairambekova, A.M., Sharkeev, Yu.P., Kovalevskaya, Zh.G., et al., Structure, phase composition and mechanical properties in bioinert zirconium-based alloy after severe plastic deformation, *Lett. Mater.*, 2017, vol. 7, no. 4, p. 469. doi: 10.22226/2410-3535-2017-4-469-472
- Sharkeev, Y., Eroshenko, A., Legostaeva, E., Kovalevskaya, Z., et al., Development of ultrafine-grained and nanostructured bioinert alloys based on titanium, zirconium and niobium and their microstructure, mechanical and biological properties, *Metals*, 2020, vol. 12, art ID 1136. <https://doi.org/10.3390/met12071136>
- Arbuz, A., Kawalek, A., Ozhmegov, K., Daniyeva, N., et al., Obtaining of UFG structure of Zr-1% Nb alloy by radial-shear rolling, *Proc. 29th Int. Conf. on Metallurgy and Materials, METAL*, 2020, p. 333.
- Wang, Y., Fu, R., Li, Y., Sang, D., et al., Microstructural stability during long-term natural storage and tensile deformation of nanograin FCC pure copper and HCP pure zirconium, *MSEA*, 2018, vol. 744, p. 171. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.11.147>
- Sharkeev, Yu.P., Vavilov, V.P., Skrypnyak, V.A., Legostaeva, E.V., et al., Research on the processes of deformation and failure in coarse- and ultrafine-grain states of Zr1–Nb alloys by digital image correlation and infrared thermography, *MSEA*, 2020, vol. 784, art ID 139203. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139203>
- Sklenicka, V., Dvorak, J., Kral, P., Betekhtin, V.I., et al., Influence of a prior pressurization treatment on creep behaviour of an ultrafine-grained Zr-2.5%Nb alloy, *MSEA*, 2021, vol. 820, art. ID 141570. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141570>
- Stepanova, E., Grabovetskaya, G.P., Mishin, I. and Bulinko, D.Yu., Structure and mechanical properties of a Zr-1Nb alloy, obtained by the method of severe plastic deformation, *Mater. Today: Proceed.*, 2015, vol. 2, p. 365. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.04.033>
- Haraguchi, R., Yoshimatsu, Y., Nagaoka, T., Arita, M., et al., Electrical resistivity mapping of titanium and zirconium discs processed by high-pressure torsion for homogeneity and phase transformation evaluation, *J. Mater. Sci.*, 2017, vol. 52, p. 6778.
- Zhang, N., Xia, C., Qin, J., Li Q., et al., Research progress of novel zirconium alloys with high strength and toughness, *J. Met. Mater. Miner.*, 2022, vol. 32, p. 23. <https://doi.org/10.55713/jmmm.v32i4.1526>
- Sklenicka, V., Kral, P., Dvorak J., Kvapilova, M., et al., Creep in nanostructured materials, *Mater. Trans.*, 2023, vol. 64, no. 7, p. 1566. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MT-MF2022035>
- Gunderov, D., Stotskiy, A.G., Gunderova, S.D., Aubakirova, V.R., et al., Impact of ECAP at 300°C on the microstructure and mechanical properties of the quenched Zr–2.5%Nb alloy, *Izvestiya. Non-Ferrous Met.*, 2024, vol. 30, no. 1, p. 81. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2024-1-81-92>
- Liu, X., Yang, C., Yang, X., Luo, L., et al., Dynamic mechanical behavior and adiabatic shear bands of ultrafine grained pure zirconium, *J. Wuhan Univ. Technol.-Mater. Sci. Ed.*, 2020, vol. 35, p. 200. <https://doi.org/10.1007/s11595-020-2244-2>
- Madhu, H.C., Anil Kumar, K.S., Gopi, K.R., Ganesh, R., et al., Simulating equal channel angular pressing of commercially pure aluminium using

- Johnson–Cook model, *Mater. Today: Proceed.*, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.05.051>
19. Wójcik, M., Hybrid, multiscale numerical simulations of the equal channel angular pressing (ECAP), *Arch. Metall. Mater.*, 2023, vol. 68, no. 4, p. 1649. <https://doi.org/10.24425/amm.2023.146235>
 20. Alateyah, A.I., Ahmed, M.M.Z., Alawad, M.O., Elkatatny, S., et al., Effect of ECAP die angle on the strain homogeneity, microstructural evolution, crystallographic texture and mechanical properties of pure magnesium: numerical simulation and experimental approach, *J. Mater. Res. Technol.*, 2022, vol. 17, p. 1491. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.088>
 21. Ghosh, B. and Ghosh, M., 3D FEM simulation of Al-Zn-Mg-Cu alloy during multi-pass ECAP with varying processing routes, *Mater. Today Commun.*, 2021, vol. 26, art. ID 102112. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102112>
 22. Quang, P., The ECAP process simulation and experiments with different back pressures for magnesium alloy, *J. Phys.: Conf. Series*, 2019, vol. 2219, art. ID 012011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2219/1/012011>
 23. Bagherzadeh, S., Abrinia, K. and Han, Q., Analysis of plastic deformation behavior of ultrafine-grained aluminum processed by the newly developed ultrasonic vibration enhanced ECAP: Simulation and experiments, *J. Manuf. Process.*, 2020, vol. 50, p. 485. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.010>
 24. Kandasamy, J., Subrahmanyam, K.V.R.K. and Kamal Kumar, D., Finite elements and investigations on flow behavior of aluminum alloys in equal channel angular pressing, *Mater. Today: Proceed.*, 2019, vol. 18, no. 7, p. 5515. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.583>
 25. Naizabekov, A., Lezhnev, S. and Panin, E., Study of the influence of the main parameters of “Rolling-ECAP” process on the stress-strain state and the microstructure evolution using computer simulation, *Proc. Manufact.*, 2019, vol. 37, p. 459. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.12.074>
 26. Surendarnath, S., Subbiah, R., Sankaranarayanan, K. and Ravisankar, B., Finite element simulation of pure aluminum processed by ECAP using new die design, *Mater. Today: Proceed.*, 2017, vol. 4, no. 2, Part A, p. 2544. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.108>
 27. Abd El Aal, M.I., 3D FEM simulations and experimental validation of plastic deformation of pure aluminum deformed by ECAP and combination of ECAP and direct extrusion, *Trans. Nonferr. Met. Soc. China*, 2017, vol. 27, no. 6, p. 1338. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60155-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60155-9)
 28. Quang, Ph., Krishnaiah, A., Hong, S.I. and Seop, H., Coupled analysis of heat transfer and deformation in equal channel angular pressing of Al and steel, *Mater. Trans.*, 2009, vol. 50, no. 1, p. 40. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MD200823>
 29. Kvačkaj, T., Zemko, M., Kočiško, R., Kuskulic, T., et al., Simulation of ECAP process by finite element method, *Kovove Mater.*, 2007, vol. 45, no. 5, p. 249.
 30. Quang, Ph., Nghiep, D.M. and Kim, Y.J., Simulation of effective stress and temperature field of the die and workpiece during ECAP of pure titanium at different ram speeds by finite volume method, *Key Eng. Mater.*, 2015, vols. 656–657, p. 532. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.656-657.532>
 31. Бескоровайный, Н.М., Калинин, Б.А., Платонов, П.А., Чернов, И.И., Конструкционные материалы ядерных реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1995. 704 с.
 32. Nikulin, S.A., Rozhnov, A.B., Aliev, R.M., Rogachev, S.O., et al., Deformability of niobium and tin bronze during compression, *Russ. Metallurgy (Metals)*, 2015, vol. 2015, no. 10, p. 836. [doi: 10.1134/S0036029515100109](https://doi.org/10.1134/S0036029515100109)

Summary

Using mathematical modeling in the QFORM software package, the data on the temperature distribution of a billet made of a zirconium alloy E110 (Zr–1%Nb) in its longitudinal and transverse sections during an equal-channel angular pressing (ECAP) were obtained. The initial data on the geometric parameters of the billet and the die of the ECAP unit are presented, and the conditions for carrying out the process of severe plastic deformation, as well as the chemical composition and physical characteristics of the Zr–1%Nb alloy necessary for carrying out the computational modeling are described. The values of the billet temperature were determined for the calculated moments of the passage of the billet through the junction of the die channels, which corresponded to 25%, 50%, and 75% of its length. It is shown that during the ECAP process at a given pressing speed, in the section corresponding to the junction of the matrix channels, an increase in the billet temperature relative to its initial heating occurred by an amount of about 10 °C.

Keywords: zirconium alloy, equal-channel angular pressing, mathematical modeling, QFORM software package, billet temperature