

ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТ В УСЛОВИЯХ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СПЛАВА СИСТЕМЫ Zr-Nb

К.В. Ожмегов, А.М. Галкин, А.С. Заводчиков, А.С. Татару

В работе представлены результаты расчетов по математической модели и экспериментальных исследований теплового эффекта пластической деформации применительно к процессам холодной и теплой пильгерной прокатки изделий из циркониевого сплава системы Zr-Nb в диапазоне температур 20–500 °С и скорости деформации 0,5 и 15 с⁻¹. Эксперименты проводились на серво-гидравлическом пластометре Gleeble 3800 методом одноосного сжатия образцов. Результаты испытаний были использованы в математической модели расчета теплового эффекта пластической деформации. С помощью модели были построены расчетные температурные поля теплового эффекта. Проведена верификация математического моделирования с результатами экспериментов.

Ключевые слова: тепловой эффект пластической деформации, холодная и теплая прокатка, сплав системы Zr-Nb, математическое моделирование.

THERMAL EFFECT OF DEFORMATION TREATMENT CONDITIONS OF ZR-NB ALLOY METAL PRODUCTS

K.V. Ozhmegov, A.M. Galkin, A.S. Zavodchikov, A.S. Tataru

This paper presents results of numerical modeling and physical research of thermal effect during cold and warm deformation treatment of zirconium alloy metal products at temperature under interval 20–500 °C during strain rate 0,5 and 15 s⁻¹. The experiments were conducted with using compression test on metallurgical process simulator «Gleeble 3800». The results of compression tests were used in a numerical model for calculating the thermal effect of plastic deformation. The temperature fields of the thermal effect were calculated in model. Verification of mathematical modeling with the results of experiments was carried out.

Keywords: thermal effect, cold and warm rolling process, zirconium alloy Zr-Nb, numerical modeling.

Введение

На пильгерных прокатных станах получают широкий сортамент осесимметричных изделий с вытянутой осью (трубы, прутки). Деформирование трубных и прутковых заготовок на прокатных станах осуществляется двумя валками, которые располагаются относительно заготовки под углом 180° друг к другу в рабочей клетке. Рабочая клетка в процессе прокатки совершает возвратно-поступательные движения в направляющих станинах. При прокатке прутков очаг деформации формируют два валка, причем радиус ручья валков больше радиуса заготовки. В случае прокатки труб очаг деформации создают два валка и оправка (рис. 1). После каж-

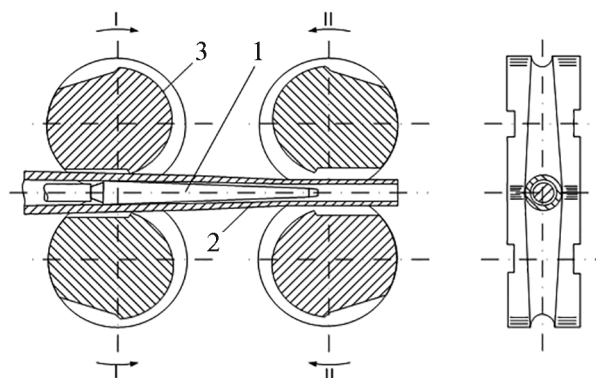


Рис. 1. Схема прокатки труб на стане типа ХПТ (КРВ):
1 — оправка; 2 — труба; 3 — валок

дого поворота в очаге деформации прокатываемое изделие движется по обжимному участку, ширина и глубина ручья которого уменьшаются по направлению хода вала. Этим обеспечивается высокая точность геометрических размеров труб и прутков финишного размера.

Высокий уровень дробности деформации в сочетании с ее локальностью при обработке на пильгерных прокатных станах способствует повышению технологической пластичности деформируемых материалов, что особенно важно при получении изделий из труднодеформируемых металлов и сплавов.

В условиях холодной и теплой деформации заметное влияние на реологическое поведение циркониевых сплавов оказывает тепловой эффект пластической деформации (ТЭПД или ΔT), который особенно значим для металлов и сплавов с гексагональной плотноупакованной решеткой [1]. С одной стороны ТЭПД приводит к снижению величины сопротивления деформации $\sigma_i = f(\bar{\epsilon})$ обрабатываемого металла ($\bar{\epsilon}$ – степень деформации), что продлевает срок службы рабочего инструмента, снижает усилие прокатки, с другой стороны требует его учета при обосновании смазок и смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ). Повышение температуры в очаге деформации при прокатке может способствовать снижению эффективности смазывающих материалов, что в свою очередь может приводить к повышению силы трения на контактной поверхности и появлению дефектов [2].

Цирконий и его сплавы имеют гексагональную плотноупакованную решетку (ГПУ) приблизительно до температуры 860 °С, а выше этой температуры – объемноцентрированную кубическую решетку [3]. Развитие деформации в ГПУ-металлах и последующий деформационный разогрев до сих пор мало изучены.

Ранее проведенные исследования показали, что сплавам на основе циркония с ГПУ решеткой присуща колебательная неустойчивость пластического течения [4]. Это явление проявляется на кривой пластического течения при изменении картины распределения локальных деформаций во времени и сопровождается периодическим накоплением деформации в ряде очагов устойчивой макролокализации и заметным проявлением теплового эффекта.

Целью работы является исследование влияния деформационно-скоростных параметров процесса холодной и теплой прокатки труб, прутков из сплава системы Zr-Nb на величину ТЭПД.

Постановка задачи и модель расчета теплового эффекта

Тепловой эффект пластической деформации играет существенную роль в условиях динамического нагружения ($\dot{\epsilon} = 10^{-1} - 10^2 \text{ с}^{-1}$), и он наиболее просто экспериментально определяется в процессе проведения пластометрических исследований [1, 4]. При этом предпочтение следует отдать методу испытаний на сжатие цилиндрических или плоских образцов, где схема напряженно-деформированного состояния наиболее близка к большинству процессов обработки металлов давлением.

Температурное поле испытываемого на сжатие образца складывается из выделения теплоты в результате теплового эффекта, теплоперепада по высоте образца и его сечению и потерь теплоты в окружающую среду (рабочие бойки, пространство рабочей камеры). Данная задача относится к задачам о нестационарной теплопередаче в движущейся несжимаемой среде с тепловыми источниками и описывается дифференциальными уравнениями в частных производных. Поэтому для получения аналитического решения данной задачи необходимо использовать определенные допущения и упрощения.

В общем виде температурное поле осаживаемого образца может быть определено решением уравнения теплопроводности для одномерной задачи:

$$\frac{dT}{dt} = \chi \Delta T + v \sigma_i \dot{\epsilon}_i, \quad (1)$$

$$\chi = \frac{\lambda}{\rho c}, \quad v = \frac{1}{c \rho \xi},$$

где χ – коэффициент температуропроводности; λ – коэффициент теплопроводности; ρ – плотность, кг/м^3 ; c – удельная теплоемкость, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; ξ – коэффициент увеличения температуры в результате деформации (обычно составляет $0,85 \div 0,90$); Δ – оператор Лапласа; σ_i и $\dot{\epsilon}_i$ – текущие значения сопротивления деформации и скорости деформации.

При решении уравнения теплопроводности (1) основной трудностью является достаточно обоснованный выбор начальных и граничных условий.

Пластометрические испытания на осесимметричное сжатие (при нагреве образцов используется вакуум) можно представить как осадку цилиндра с переменной высотой $h(t)$, равномерно нагретого до температуры T_0 . В про-

цессе испытаний на контактных поверхностях осаживаемого образца, находящегося между массивными бойками (размеры бойков в несколько раз больше размеров образца), нагретыми до той же температуры, поддерживаются температурные условия $T_0 = \text{const}$. Теплообменом на боковой поверхности образца в первом приближении можно пренебречь, а работу сил трения учитывают через σ_i .

В результате этих упрощений задача сводится к решению уравнения теплопроводности для деформируемого стержня с граничными условиями первого рода [1, 4]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial T \cdot V_0 \cdot x}{\partial x \cdot h(t)} = \chi \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + v \sigma_i \dot{\epsilon}_i, \quad (2)$$

$$T(x, 0) = T_0, \quad T(0, t) = T_0, \quad T(h(t), t) = T_0$$

где V_0 – скорость деформирования, м/с.

Наличие в уравнении (2) конвективного члена затрудняет решение, поэтому целесообразно перейти от эйлеровой системы координат к лагранжевой. Для этого введем новую систему координат: $x_1 = \frac{x}{h(t)}$, $t = t$.

После дифференцирования и упрощения уравнение (2) принимает вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 T}{\partial x_1^2 h^2(t)} + v \sigma_i \dot{\epsilon}_i, \quad (3)$$

где граничные условия: $T(0, t) = T_0$; $T(1, t) = T_0$, а начальное условие $T(x_1, 0) = T_0$.

Применив к уравнению (3) конечное интегральное преобразование (синус-преобразование Фурье), получим:

$$\frac{dT_C}{dt} = -\chi \frac{\pi^2 n^2}{h^2(t)} T_C + \frac{v \sigma_i V_0 0}{\pi n (h_0 - V_0 t)} [1 - (-1)^n], \quad (4)$$

где $T_C = \int_0^1 T(x_1, t) \sin \pi n x_1 dx_1$ – отображение функции $T(x_1, t)$ при $n=1, 3, 5 \dots$

Для определения T_C имеем следующее решение:

$$T_C = e^{-\frac{b_n}{h_0 - V_0 t}} C_n \left[\bar{E}_i \left(\frac{b_n}{h_0 - V_0 t} \right) - \bar{E}_i \left(\frac{b_n}{h_0} \right) \right], \quad (5)$$

$$b_n = \chi \frac{\pi^2 n^2}{V_0}; \quad C_n = \frac{v \sigma_i}{\pi n} [1 - (-1)^n];$$

$$\bar{E}_i = \bar{E}_i(Z) = \tau + \ln Z + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{Z^k}{k k!},$$

где $\bar{E}_i$ – модифицированная интегральная показательная функция.

Переходя от изображения $T_C(n, t)$ к оригиналу $T(x_1, t)$, получаем окончательное решение уравнения (3) в виде

$$T(x_1, t) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{b_n}{(h_0 - V_0 t)}} C_n \times \left[\bar{E}_i \left(\frac{b_n}{h_0 - V_0 t} \right) - \bar{E}_i \left(\frac{b_n}{h_0} \right) \right] \sin \pi n x_1. \quad (6)$$

С использованием представленной выше модели были построены расчетные температурные поля ТЭПД при осадке цилиндрических образцов с начальной высотой h_0 до высоты h_k из циркониевого сплава системы Zr-Nb (1,0% Nb, 0,07% Fe, 0,09% O) диаметром 10 мм и высотой 12 мм в диапазоне $T_{\text{исп}} = 20 - 500$ °C, скорости деформации $\dot{\epsilon} = 0,5$ и 15 с⁻¹ и степени деформации $\bar{\epsilon} = \ln \left(\frac{h_0}{h_i} \right)$ до 1,0 (рис. 2).

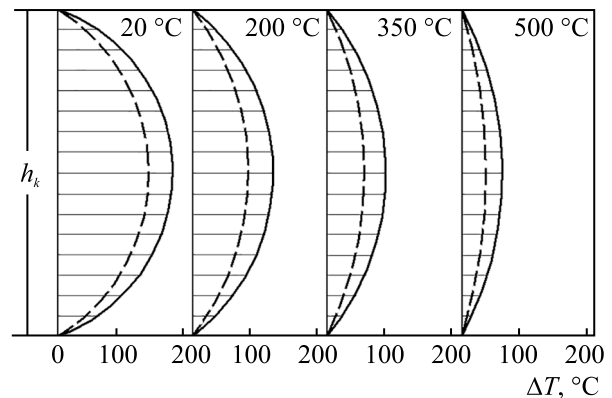


Рис. 2. Расчетные эпюры величины ΔT при испытаниях на сжатие сплава Zr-Nb в диапазоне 20–500 °C:
сплошные кривые – $\dot{\epsilon} = 15$ с⁻¹;
штриховые кривые – $\dot{\epsilon} = 0,5$ с⁻¹

В расчетах были использованы следующие усредненные теплофизические характеристики данного сплава: плотность – 6,51 г/см³; удельная теплоемкость – 473 Дж/(кг·К); теплопроводность – 26,7 Вт/(м·К); температуропроводность – $10,2 \cdot 10^6$ м²/с.

Значения сопротивления деформации $\sigma_i = f(\bar{\epsilon})$ сплава Zr-Nb вводились в расчеты по экспериментальным данным, полученным на пластометрической установке Gleeble 3800 в условиях холодной и теплой деформации. На рис. 2 эпюры температурных полей ТЭПД имеют сходный параболический характер с максимумом в середине конечной высоты испытываемого образца h_k .

Величина ТЭПД максимальна при $T_{\text{исп}} = 20^\circ\text{C}$ и с ростом температуры испытаний заметно снижается. Повышение скорости деформации до $\dot{\varepsilon} = 15\text{ c}^{-1}$ при всех температурах испытаний приводит к существенному увеличению теплового эффекта ΔT , особенно в диапазоне $20\text{--}200^\circ\text{C}$. Следующим этапом исследования было проведение эксперимента по получению опытных данных по замеру величины ТЭПД при пластометрических испытаниях данного сплава.

Методика испытаний и результаты экспериментальных исследований

Для получения опытных данных по определению величины ТЭПД сплава Zr-Nb в условиях динамического нагружения был использован пластометрический комплекс *Gleeble 3800*.

Испытания проводились в вакууме в рабочей камере модуля *Pocket Jaw*. Вакуумная система обеспечивала разряжение не менее 1×10^{-4} мм рт. ст. Сплошные цилиндрические образцы с диаметром рабочей части 10 мм и высотой 12 мм вырезали из холоднокатаных отожженных образцов. Состояние сплава после холодной деформации и отжига полностью рекристаллизованное. Испытания проводили методом сжатия в температурном интервале $20\text{--}500^\circ\text{C}$ и скоростном диапазоне $0,5\text{--}15\text{ c}^{-1}$.

Нагрев образцов осуществлялся прямым пропусканием электрического тока с регулируемой скоростью нагрева 5°C/c . Контроль температуры образцов проводился с помощью хромель-копелевой термопары, привариваемой к центральной части образца на сварочной

установке *Thermocouple Welder*. Система управления температурой нагрева и выдержки перед испытаниями обеспечивала точность с погрешностью не более $\pm 1^\circ\text{C}$. Термопары, приваренные к образцам, выполняли не только контроль температуры нагрева, но и замер величины ТЭПД (ΔT) в процессе испытаний. Обработка опытных данных всех параметров осуществлялась на специальном языке программирования *Gleeble System Language* с уровнем погрешности не более 2-3 %.

Для записи усилий использовались тензодатчики, а для записи деформаций – датчики перемещений подвижной траверсы. Скорость перемещения активного захвата на данной установке автоматически пересчитывалась в значения скорости деформации с размерностью c^{-1} .

Из рис. 3 следует, что характер изменения величины ΔT в зависимости от температуры испытаний при $\dot{\varepsilon}_1 = 0,5\text{ c}^{-1}$ и $\dot{\varepsilon}_2 = 15\text{ c}^{-1}$ примерно одинаков. Следует также отметить, что при повышенной скорости нагружения ($\dot{\varepsilon} = 15\text{ c}^{-1}$) уровень значений ΔT заметно выше, поскольку испытания проходят практически в адиабатических условиях. Разницу в уровне экспериментальных и расчетных кривых теплового эффекта можно объяснить тем, что опытные значения ΔT были получены для поверхности осаживаемых образцов. Расчетные же значения ΔT определялись как усредненные по сечению образцов в середине конечной высоты h_k (см. рис. 2).

С ростом температуры испытаний разница в величине ΔT по экспериментальным и расчетным данным снижается (см. рис. 3).

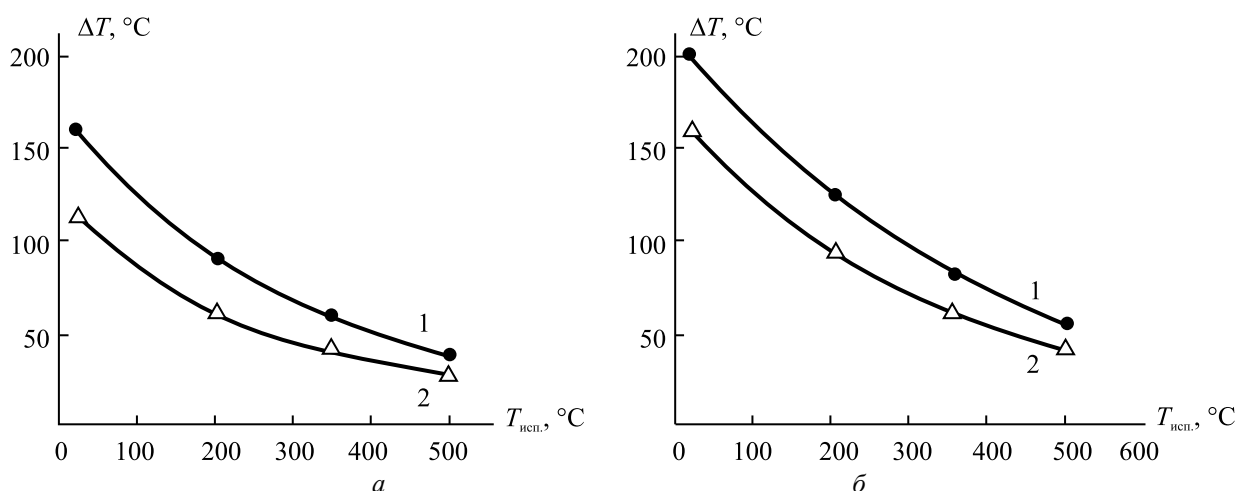


Рис. 3. Изменения величины ΔT при испытаниях на сжатие сплава Zr-Nb в диапазоне $20\text{--}500^\circ\text{C}$ при $\dot{\varepsilon}_1 = 0,5\text{ c}^{-1}$ (а) и $\dot{\varepsilon}_2 = 15\text{ c}^{-1}$ (б): 1 – расчетная кривая; 2 – экспериментальная кривая

Выводы

Для сплава системы Zr-Nb, как типичного ГПУ металла, характерен весьма значительный тепловой эффект при динамическом нагружении в условиях холодной и теплой деформации, что необходимо учитывать при назначении режимов обработки данного материала.

Результаты проведенного пластометрического исследования подтвердили корректность использованной в работе модели расчета ТЭПД при различных термомеханических параметрах деформации сплава системы Zr-Nb.

Заключение

Результаты проведенной работы будут полезны при разработке математической модели холодной и теплой пильгерной прокатки изделий из сплава системы Zr-Nb. Экспериментальные данные могут быть использованы для расчета величины ТЭПД в очаге деформации прокатного стана. Полученные значения ТЭПД могут применяться для дополнительного обоснования выбора смазок и СОЖ.

Список литературы

1. Мочалов Н.А., Галкин А.М., Мочалов С.Н. Пластометрические исследования металлов. М.: Интермет Инжиниринг, 2003. – 318 с.
2. Исследование влияния деформационно-скоростных условий пильгерной прокатки на качество труб и характеристики сплава Zr-1%Nb / К.В. Ожмегов, М.И. Сергачева, А.А. Кабанов // Машиностроение и инженерное образование. 2017. № 3 (52). С. 16–21.
3. Займовский А.С., Никулина А.В. Решетников Н.Г. Циркониевые сплавы в ядерной энергетике. М.: Энергоатомиздат, 1994. – 256 с.
4. К неравномерности течения металла в условиях динамического нагружения / А.М. Галкин, Х. Дья, Б. Кочуркевич и др. // Сб. статей Международной конференции «Прогрессивные технологии пластической деформации», МИСиС. Москва, 2009. С. 259–266.

ОЖМЕГОВ Кирилл Владимирович

E-mail: kirillozhmegov@yandex.ru
Тел.: (499) 190-89-99 доб. 84-38

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник АО «ВНИИНМ» им. А.А. Бочвара. Сфера научных интересов: физическое моделирование процессов ОМД, исследование реологических характеристик цветных сплавов. Автор более 30 научных статей.

ГАЛКИН Александр Михайлович

E-mail: astataru@gmail.com
Тел.: (499) 236-65-33

Доктор технических наук, профессор НИТУ «МИСиС». Сфера научных интересов: сопротивление пластической деформации металлов и сплавов, пластометрические исследования металлов. Автор более 80 научных статей.

ЗАВОДЧИКОВ Александр Сергеевич

E-mail: ASZavodchikov@bochvar.ru
Тел.: (499) 190-89-99 доб. 84-38

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник АО «ВНИИНМ» им. А.А. Бочвара. Сфера научных интересов: обработка металлов давлением. Автор более 30 научных статей.

ТАТАРУ Александр Сергеевич

E-mail: astataru@gmail.com
Тел.: (499) 236-65-33

Кандидат технических наук, ассистент кафедры ОМД НИТУ «МИСиС». Сфера научных интересов: исследования высокопрочных сталей типа DP, TRIP, CP для разработки и совершенствования методов их обработки. Автор более 20 научных статей.