

**КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. И. РАЗЗАКОВА**

ДИССЕРТАЦИОННЫЙ СОВЕТ Д 01.05.267

На правах рукописи
УДК 539.374; 539.376

САДЫКОВ МАКСАТ АМАНГЕЛДИЕВИЧ

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ
СПЕЦИАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

Специальность 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

**Диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук**

Бишкек - 2006

Работа выполнена в Жалалабатском государственном техническом институте
и в Кыргызско-Российском Славянском университете

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор Сеитов Б.М.

Официальные оппоненты: - доктор технических наук,
профессор Свиденко В.Н.

- доктор физико-математических наук,
профессор Дуйшеналиев Т.Б.

Ведущая организация: - Институт физики НАН КР

Защита состоится 15 декабря 2006 года в 14.00 часов на заседании
Диссертационного совета Д 01.05.267 по защите диссертаций на соискание
ученой степени доктора (кандидата) наук Кыргызского государственного
технического университета им. И. Раззакова по адресу: 720044, г. Бишкек, пр.
Манаса, 66.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Кыргызского
государственного технического университета им. И. Раззакова.

Автореферат разослан «___» _____ 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.т.н., профессор КГТУ

А.С. Иманкулова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Развитие техники определяет широкое использование специальных, как правило, сложнолегированных сталей и сплавов, обладающих комплексом высоких физико-механических свойств. Горячая обработка давлением этих материалов затруднена из-за ограниченной пластичности и высокого сопротивления деформации. Для получения качественных полуфабрикатов требуемого сортамента и точности размеров необходимо совершенствовать технологические процессы обработки и осваивать новые способы деформирования.

В последние годы для изготовления точных заготовок из труднодеформируемых сталей все более широко применяется высокоскоростная объемная штамповка, имеющая преимущества по сравнению со штамповкой на обычных молотах и прессах. При высокоскоростной штамповке повышается деформируемость многих сталей и сплавов, что позволяет интенсифицировать режимы и повысить точность обработки. Однако освоение этого прогрессивного способа сдерживается отсутствием количественных данных о параметрах обработки давлением (пластичность, сопротивление и удельная энергия деформации) специальных труднодеформируемых сталей в интервале температур и скоростей, применяемых при высокоскоростной объемной штамповке.

В экспериментальных исследованиях по оценке сопротивления деформации, показателей пластичности металла и других параметров, необходимых для процессов обработки металлов давлением в зависимости от режимов деформирования при высокотемпературных и скоростных условиях нагружения, в основном применяются испытания материала на осадку. При этом в качестве характеристики сопротивления деформации принимают величину удельного усилия осадки в условиях относительно равномерной деформации образца. Поэтому настоящая работа посвящена исследованию параметров процесса горячей осадки труднодеформируемых сталей (НН-3Б, Ди 8, ЭП 56, ЭП 311, ЭИ 572 и др.) в широком диапазоне изменения скоростей деформации ($\dot{\epsilon} = 5 \dots 2 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$) с целью оптимизация термомеханических режимов штамповки на высокоскоростном и обычном оборудовании.

Цель и задачи исследования. На основе экспериментального и теоретического исследования установить температурные режимы при высокоскоростном деформировании специальных нержавеющей и высокопрочных сталей, соответствующих их оптимальным показателям пластичности, сопротивления и удельной энергии деформации с целью реализации технологических процессов высокоскоростного объемного деформирования указанных сплавов.

Для достижения данной цели решены следующие задачи:

- разработка и обоснование методики экспериментального исследования закономерностей высокоскоростного деформирования высокопрочных нержавеющей сталей в условиях повышенных температур;
- изучение изменения предельной степени деформации указанных сталей в широком диапазоне температур и высокоскоростных условиях нагружения;

- определение значений энергосиловых параметров (величина усилия, сопротивления деформации и удельной энергии) деформирования в зависимости от температурно-скоростных условий нагружения;
- исследование возникающих в процессе высокоскоростного деформирования внутренних факторов, температурного эффекта пластической деформации и инерционных сил в зависимости от режимов нагружения и влияние их на энергосиловые параметры деформирования.

Научная новизна работы:

- установлены основные закономерности изменения деформационных и энергосиловых параметров деформирования высокопрочных нержавеющей сталей в широком диапазоне температур и высокоскоростных условиях нагружения;
- установлено, что при высокоскоростных условиях деформирования увеличение сопротивления деформации исследованных сталей наблюдается в начальном этапе нагружения, с увеличением деформации и понижением температуры влияние скорости на сопротивление деформации снижается;
- в интервале скоростей деформации $1 \cdot 10^3 \dots 2 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ предельная степень (ε_{np}) деформации сталей 0X18H5Г12АБ, 0X20H5АГ12МФ и 10X16H4БА увеличивается на 8...15% по сравнению со скоростью $\dot{\varepsilon} = 5 \text{ c}^{-1}$;
- предельная степень деформации стали 25X12H2B2M2Ф практически не изменяется с повышением скорости от 5 до $2 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$;
- величина температурного эффекта пластической деформации зависит, в основном, от химического состава, степени деформации, температуры нагрева и мало зависит от скорости при скоростях деформирования 5 и $1 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$.

Достоверность полученных результатов. Достоверность результатов получено корректурным использованием методов математической статистики и сопоставлением теоретических и экспериментальных данных.

Практическая значимость полученных результатов.

Практическая значимость результатов являются:

- разработка системы измерений и регистрации высокоскоростных процессов деформируемого металла при повышенных температурах;
- разработка методики экспериментального изучения специальных сталей и сплавов при скоростном деформации и повышенных температурах;
- разработка предложений и рекомендаций по изготовлению полуфабрикатов из труднодеформируемых сталей.

Основные положения и результаты, вносимые на защиту:

- результаты экспериментального изучения закономерностей деформирования высокопрочных нержавеющей сталей при высоких скоростях нагружения и повышенных температурах;
- опытные данные об изменении предельной степени деформации;
- установление закономерностей энергосиловых характеристик процесса деформирования в зависимости от температурно-скоростных условий;
- выявление влияния инерционных сил и температурного эффекта на энергосиловые параметры деформирования.

Апробация результатов диссертации. Основные научные положения, выводы апробированы на республиканских и международных научных

конференциях: региональной научно-практической конференции КРСУ «Наука и наукоемкие горные технологии» (Бишкек, 2000); международной научной конференции КТУ «Современные технологии и управление качеством в образовании, науке и производстве: опыт адаптации и внедрение +» (Бишкек, 2001); VIII симпозиум Российской Академии Наук «Динамика виброударных систем» (Москва, 2001); региональной научно-теоретической конференции «Современные проблемы науки, техники и образования» (Жалалабат, 2002); II региональной научно-теоретической конференции «Современные проблемы науки, техники и образования» (Жалалабат, 2003); научно-практической конференции КРСУ «Актуальные вопросы физики, образования и экологии», посвященной 60-летию профессора Лелевкина В.М. (Бишкек, 2004); IV Международной научной конференции «Прочность и разрушение материалов и конструкций» (Москва, 2005); республиканской научно-технической конференции «Новые технологии получения композиционных материалов на основе местного сырья и их применение в производстве» (Ташкент, 2005).

Опубликованность результатов. По материалам диссертационной работы опубликовано 10 работ, в которых отражены основные результаты, изложенные в диссертации.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, трех глав, выводов, содержит 143 страницы текста, 47 рисунков, 18 таблиц, список литературы из 147 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕЖАНИЕ РАБОТЫ

Теоретическому и экспериментальному исследованию высокоскоростного деформирования металла посвящен ряд работ отечественных и зарубежных исследователей: С.И.Губкина, Н.Н.Давиденкова, Л.Д.Соколова, Л.М.Шестопалова, Ю.П.Алексеева, Ф.Ф.Витмана, Н.А.Златина, Н.А.Степанова, Н.Ф.Радзивончика, П.И.Полухина, А.К.Григорьева, Н.П.Агеева, Ю.П.Согришина, П.А.Мещанчука, Х.Метзлера, Ф.Граздила и др. Благодаря усилиям этих исследователей удалось установить ряд закономерностей, формирующих представления о явлениях, происходящих в металле при его высокоскоростном деформировании.

В первой главе установлено, что при горячей высокоскоростной осадке по сравнению со статическими скоростями нагружения изменяется характер неравномерности деформации заготовок при осадке; уменьшается коэффициент контактного трения; возрастает действие инерционных сил; изменяются тепловые условия процесса деформирования металла, характер протекания релаксационных процессов, механизм пластической деформации и т.д. Указанные факторы оказывают заметное влияние на сопротивление деформации и пластичность металла. Существующие аналитические методы расчетов не позволяют определять зависимости сопротивления деформации сталей и сплавов от термомеханических параметров с учетом указанных выше факторов. В настоящее время опубликован ряд работ по экспериментальному исследованию энергосиловых параметров и пластичности некоторых материалов в температурно-скоростном диапазоне, характерном для горячей объемной высокоскоростной штамповки. Однако номенклатура исследованных

материалов ограничена сплавами на основе титана и алюминия, низколегированными конструкционными и инструментальными сталями; практически нет данных по исследованию труднодеформируемых нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов. Поэтому большое значение для теории и практики обработки металлов давлением имеет накопление и систематизация экспериментальных данных о сопротивлении и пластичности различных классов труднодеформируемых сталей и сплавов в широком диапазоне скоростей деформации.

При пластической деформации металла значительная часть затраченной энергии превращается и выделяется в виде тепла. Повышение температуры в деформируемом металле активизирует релаксационные процессы, понижает уровень напряжений, необходимых для дальнейшего развития пластической деформации. Величина температурного эффекта пластической деформации (в дальнейшем изложении ТЭПД) зависит от химического состава материала, температуры нагрева, скорости и степени деформации, а также теплофизических свойств материала. Существующие в настоящее время теоретические и экспериментальные методы исследования ТЭПД позволяют определять только среднее повышение температуры в деформируемом макрообъеме металла. В литературе нет систематизированных количественных данных по исследованию ТЭПД при высокоскоростном деформировании нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов.

Вторая глава посвящен разработке методики экспериментального исследования параметров процесса высокоскоростной осадки. Большое внимание уделялось повышению точности и стабильности результатов эксперимента, а также повышению точности и снижению трудоемкости при обработке экспериментальных данных. Подробный анализ существующих методов экспериментального определения указанных параметров позволил установить достоинства и недостатки экспериментальной техники и создать комплекс специального оборудования, приборов и методик, обеспечивающих стабильность и точность результатов измерений. Для проведения испытаний на ударную усадку разработан и изготовлен пневматический вертикальный высокоскоростной копер, имеющий три ствола различного диаметра. Возможность плавной регулировки давления газа в рабочем клапане копра позволяет практически бесступенчато изменять начальную скорость удара на копре от 8 до 100 $m \cdot c^{-1}$ и получать энергию удара до 150 кН. Для измерения начальной скорости удара на копре был разработан и изготовлен специальный прибор, работающий на принципе измерения времени прохождения базового пути. В качестве датчика в приборе использован фотодиод. При определении начальной скорости удара от 8 до 100 $m \cdot c^{-1}$ точность прибора составляет $\pm 2,5$ %. Для измерения усилия высокоскоростной осадки применялась тензометрическая усилительная схема. В качестве регистрирующего прибора использовался катодный осциллограф модели С1-29. Для усиления сигналов, поступающих с силоизмерителя при деформировании образцов, была разработана и изготовлена специальная усилительная приставка переменного тока с полосой пропускания частот до 1 МГц и коэффициентом усиления 100.

Усилительная приставка довольно проста в изготовлении и мало чувствительна к помехам.

Для повышения точности экспериментального определения усилия ударной осадки разработана методика учета динамических свойств упругого силоизмерителя при обработке осциллограмм усилия. Как известно из литературы, упругий силоизмеритель можно с достаточной точностью представить как линейную систему с передаточной функцией:

$$W(\Delta) = \frac{K}{\tau^2 \Delta^2 + 2\varphi \cdot \tau \Delta + 1} = \frac{U_{\text{вых}}(\Delta)}{U_{\text{вх}}(\Delta)}, \quad (1)$$

где $U_{\text{вх}}(\Delta)$ и $U_{\text{вых}}(\Delta)$ – изображения по Лапласу входного и выходного сигналов; K – коэффициент передачи измерительной системы, в которую сходит силоизмеритель; τ – постоянная времени; φ – коэффициент демпфирования; Δ – оператор дифференцирования.

На основании соотношения (1) можно записать выражение для определения ординаты осциллограммы с учетом динамических свойств силоизмерителя:

$$U_{\text{вх}} = \frac{1}{K} \left(\tau^2 \cdot \frac{d^2 U_{\text{вых}}}{dt^2} + 2\varphi\tau \frac{dU_{\text{вых}}}{dt} + U_{\text{вых}} \right). \quad (2)$$

Коэффициент K определяется из статической тарировки силоизмерителя, а коэффициенты τ и φ определяются на основании экспериментального исследования силоизмерителя при динамических нагрузках.

Известно, что при проведении испытаний на ударную осадку на копре невозможно обеспечить постоянство скорости деформации в течение всего процесса осадки. Однако можно подобрать такой вес бойка, который обеспечит приближенное равенство скорости деформации в начальный момент удара и при достижении заданной степени деформации ε_n , а, в конечном счете, – относительное постоянство скорости деформации в процессе ударной осадки. На основании экспериментальных исследований и аналитических расчетов установлен оптимальный вес бойка P_n , необходимый для осадки образца данного размера и марки материала со средней скоростью деформации $\dot{\varepsilon}$ до заданного значения относительной степени деформации ε_n :

$$P_n = \frac{2A_n e_n g \mathcal{V} (2 - \Delta V_n)^2}{\dot{\varepsilon}^2 h_0^2 (2 - \varepsilon_n)^2}, \quad (3)$$

где A_n – коэффициент избытка энергии; $A_n = 1,3 \dots 1,5$; e_n – удельная энергия деформации материала при данных значениях температуры, скорости и степени деформации; \mathcal{V} – объем образца; g – ускорение свободного падения; h_0 – исходная высота образца; ΔV_n – относительное изменение скорости деформации в процессе осадки, $\Delta V_n = \frac{V_0 - V_n}{V}$; V_n – скорость деформирования в момент достижения заданной степени деформации ε_n .

На основании экспериментальных исследований установлено, что относительное изменение скорости деформирования в процессе осадки зависит

практически только от коэффициента A_n . Для исследуемых в работе марок материала эту зависимость можно аппроксимировать выражением:

$$\Delta V_n = 0,437 - \frac{1,13}{A_n} + \frac{1,64}{A_n^2} \quad (4)$$

Для проведения эксперимента с заданной скоростью деформации $\dot{\varepsilon}$ начальная скорость удара на копре определялась по формуле

$$V_0 = \frac{\dot{\varepsilon} \cdot h_0 (2 - \varepsilon_n)}{2 - \Delta V_n} \quad (5)$$

Установлено, что если вес бойка соответствует весу, определенному по формуле (3), то максимальное отклонение скорости деформации в процессе осадки от значения $\dot{\varepsilon}_0 = \frac{V_0}{h_0}$ не превышает 15...20 %. Такое изменение скорости

деформации в процессе осадки не оказывает влияния на сопротивление деформации. Поэтому можно считать, что формоизменение образцов происходит при относительно постоянной скорости деформации. Разработанная методика испытаний на копре с заданным скоростным режимом осадки использовалась в работе при исследовании всех параметров.

Для выполнения расчетов по формуле (3) необходимо знать величину удельной энергии деформации (e) для данной марки стали и условий испытания (температура, скорость и степень деформации). Определение удельной энергии деформации для всех исследуемых в работе марок стали производилось методом планирования эксперимента.

Экспериментальное определение кривых «усилие – время» и начальной скорости удара на копре позволяет расчетным путем, используя известный в литературе метод последовательного двукратного интегрирования, получить кривые «абсолютная деформация – время». Текущие значения сопротивления деформации определялись по формулам:

$$\sigma = \frac{P}{\varepsilon}, \quad F = \frac{F_0}{7 - \varepsilon_0}, \quad \varepsilon_{от} = \frac{\Delta h}{h_0}, \quad (6)$$

где P – нагрузка в данный момент деформации; F – площадь поперечного сечения образца в данный момент деформации; $\varepsilon_{от}$ – относительная степень деформации.

Текущие значения удельной энергии деформации определялись методом интегрированием кривых «усилие – абсолютная деформация».

Для исследования усилия осадки использовались цилиндрические образцы диаметром 15 мм и высотой 20 мм. Нагрев образцов производился в электрической печи сопротивления модели СУОЛ-0,4-4/12. Образцы перед нагревом покрывались специальной теплоизоляционной боросиликатной обмазкой, разработанной НИИ химии силикатов РАН. Использование данной обмазки значительно уменьшало подстуживание образцов при проведении испытаний. Исследования показали, что уменьшение температуры образца с момента выдачи его из печи и до начала осадки не превышало 293...303 К при температурах нагрева 1073...1473К. Чтобы компенсировать потери тепла, образцы перегревались на 293...303К выше заданной температуры.

Теплоизоляционная боросиликатная обмазка использовалась при проведении всех испытаний на осадку.

Из известных в настоящее время экспериментальных методов определения ТЭПД при осадке наиболее приемлемым является метод с применением искусственных термопар. В наших исследованиях ТЭПД использовались хромель-алюмелевые термопары специальной конструкции, которые зачеканивались в образцы высотой 27 мм и диаметром 20 мм.

Известно, что в процессе высокоскоростного деформирования точную регистрацию ТЭПД с помощью термопар осуществить невозможно, что объясняется влиянием на результаты измерений контактного трения, деформации и тепловой инерции термопары. Величину ТЭПД, соответствующую конечному моменту формоизменения исследуемого образца, можно регистрировать с большой точностью с помощью магнитно-электрических осциллографов. Поэтому в работе применялся шлейфовый осциллограф модели К9-21. Для компенсации термо ЭДС, возникшей при нагреве образца с термопарой до заданной температуры испытания, было разработано специальное устройство – «компенсатор температуры», с помощью которого в электрической цепи создавалось ЭДС, равное по величине и противоположное по знаку термо ЭДС термопары. В процессе испытаний записывались с помощью осциллографа К9-21 температуры образца с момента выдачи его из печи и до окончания деформирования. Применение описанной методики исследования ТЭПД позволило с точностью до ± 283 К выдержать температуру начала деформирования образца, соответствующую заданной температуре испытаний. Это повысило стабильность результатов измерений.

Расчетом с помощью метода «мгновенных источников тепла», было установлено, что при ударном деформировании нержавеющей стали в горячем состоянии со скоростью деформации $\dot{\epsilon} \geq 4 \cdot 10^2 \text{ c}^{-1}$, условия формоизменения близки к адиабатическим. Поэтому при определении ТЭПД высокоскоростной осадки нижней границы исследуемого диапазона скорости деформации была принята скорость $5 \cdot 10^2 \text{ c}^{-1}$. Исследование ТЭПД в зависимости от температуры нагрева, скорости и степени деформации проводилось методом планирования эксперимента.

При исследовании предельной степени деформации при осадке $\epsilon_{пр}$ использовался известный метод определения максимальной величины относительной деформации образца при данных условиях эксперимента, выше которой появляются первые трещины на боковой поверхности осаженного образца, видимые невооруженным глазом. Для исследования $\epsilon_{пр}$ использовались цилиндрические образцы диаметром 15 мм и высотой 20 мм.

Исследования всех параметров со средней скоростью деформации 5 c^{-1} проводились на кривошипном прессе усилием 100 тс. Для определения усилий осадки на кривошипном прессе использовалась тензометрическая усилительная схема. Для измерения перемещения ползуна пресса в процессе деформации был разработан и изготовлен специальный прибор с потенциометрическим датчиком. Запись осциллограмм «усилие – время» и «деформация – время» производилась на шлейфовом осциллографе модели К9-21. В качестве

усилителя использовалась тензостанция модели УС 1-12/35 с блоком питания ВТ-12. Сопротивление деформации вычислялось по формуле (6). Удельная работа деформации определялась методом интегрирования кривых «усилие – абсолютная деформация». Установление ТЭПД при осадке образцов на кривошипном прессе производилось по методике, аналогичной определению ТЭПД на копре.

В третьей главе представлены и проанализированы результаты опытов. Исследование предельной степени деформации ε_{np} производилось при температурах нагрева 1073, 1273, 1373, 1473 и 1523 К и скорости деформации $\dot{\varepsilon} = 5, 1 \cdot 10^3$ и $2 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$. Исследовались стали ОХ18Н5Г12АБ, ОХ20Н5АГ12МФ, 25Х12Н2В2М2Ф и 10Х16Н4БА. Установлено, что данные марки стали имеют ограниченную пластичность в исследованном температурно-скоростном диапазоне. С повышением скорости деформации от 5 до $1 \cdot 10^2 \text{ c}^{-1}$ ε_{np} сталей ОХ18Н5Г12АБ и ОХ20Н5АГ12МФ (рис. 1, рис. 2) возрастает на 5...15 % в диапазоне температур 1073...1473 К; ε_{np} стали 10Х16Н4БА практически не изменяется при температурах 1073...1273 К и возрастает на 5...16 % при температурах 1373...1473 К; ε_{np} стали 25Х12Н2В2М2Ф возрастает на 5 % при температурах 1473...1523 К. При $\dot{\varepsilon} = 1000 \text{ c}^{-1}$ и $T = 1073...1523 \text{ К}$ ε_{np} сталей ОХ18Н5Г12АБ и ОХ20Н5АГ12МФ соответственно равна 62...65 % и 47...50 %, а ε_{np} сталей 25Х12Н2В2М2Ф и 10Х16Н4БА соответственно равна 47...56 % и 69...72 %. Дальнейшее повышение скорости деформации от 1000 до 2000 c^{-1} практически не сказывается на величине ε_{np} указанных сталей при температурах 1073...1523 К.

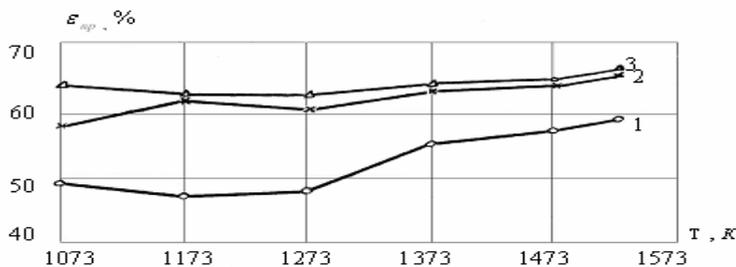


Рис. 1 Зависимость предельной степени деформации ε_{np} от температуры T при различных скоростях деформации $\dot{\varepsilon}$. Сталь ННЗБ (ОХ18Н5Г12АБ)
 1 – $\dot{\varepsilon} = 5 \text{ c}^{-1}$; 2 – $\dot{\varepsilon} = 1 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$; 3 – $\dot{\varepsilon} = 2 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$.

Исследование сопротивления деформации σ и удельной энергии e проводились при температурах нагрева $T = 1073, 1173, 1273, 1373$ и 1473 К ; скоростях деформации $\dot{\varepsilon} = 5,5 \cdot 10^2, 1 \cdot 10^3$ и $2 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ и степенях деформации $\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h} = 0,11...0,8$. Исследовались стали ОХ18Н5Г12АБ, ОХ20Н5АГ12МФ,

3Х19Н9МВБТ, Х18Н10Т, 25Х12Н2В2М2Ф, 10Х16Н4БА, Х17Н2 и 1Х13. По экспериментальным данным построены зависимости $\sigma = f_1(\varepsilon)$ и $e = f_2(\varepsilon)$ для всех исследованных марок стали, температур нагрева и скоростей деформации. Из анализа этих зависимостей можно сделать некоторые выводы, характерные для всех или большинства исследованных сталей.

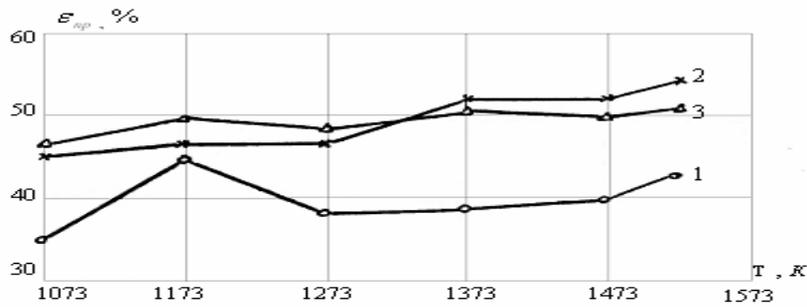


Рис. 2 Зависимость предельной степени деформации ε_{np} от температуры T при различных скоростях деформации $\dot{\varepsilon}$. Сталь ДИ8 (0X20H5AG12MΦ)
 1 – $\dot{\varepsilon} = 5 c^{-1}$; 2 – $\dot{\varepsilon} = 1 \cdot 10^3 c^{-1}$; 3 – $\dot{\varepsilon} = 2 \cdot 10^3 c^{-1}$.

При деформации со скоростью $\dot{\varepsilon} = 5 c^{-1}$ характер зависимостей $\sigma = f_1(\varepsilon)$ (рис.3) примерно одинаковый для всех исследованных сталей. При повышении степени деформации от $\varepsilon = 0,11$ до $\varepsilon = 0,22 \dots 0,29$ сопротивление деформации интенсивно возрастает при температурах 1073...1473 К, а при дальнейшем повышении степени деформации – практически не изменяется или изменяется незначительно. При скоростях деформации $\dot{\varepsilon} = 5 \cdot 10^2 \dots 1 \cdot 10^3 c^{-1}$ характер кривых упрочнения сталей заметно изменяется и определяется температурой, скоростью деформации и химическим составом материала.

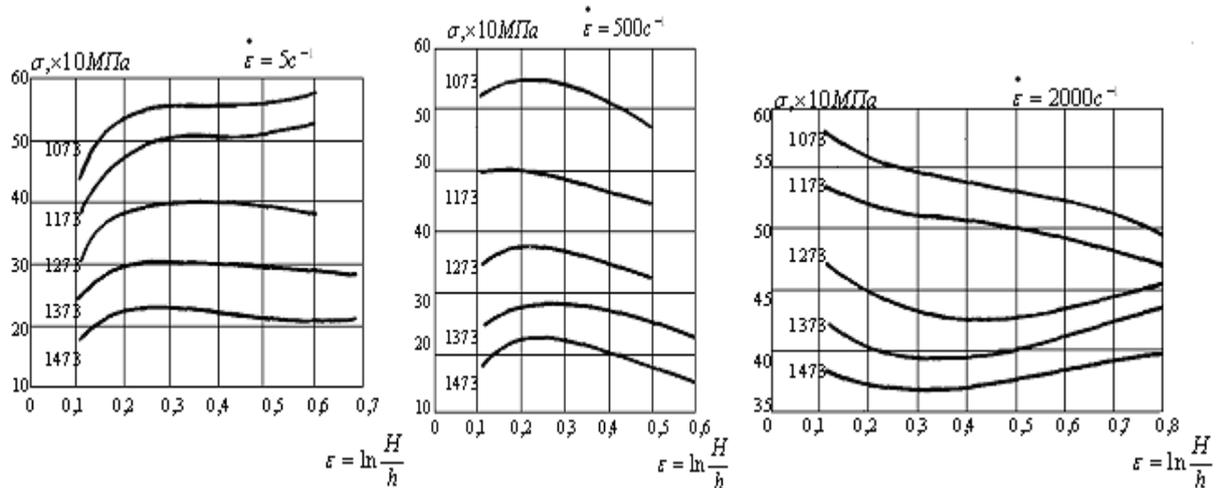


Рис. 3 Графики зависимости сопротивления деформации σ от степени деформации ε при различных скоростях $\dot{\varepsilon}$ и температурах начала деформации. NN-3B (0X18H5G12AB).

Например, характерным является наличие максимумов на кривых упрочнения труднодеформируемых сталей 0X18H5G12AB, 0X20H5AG12MΦ, 25X12H2B2M2Φ и 10X16H4BA при температурах 1073...1273 К в области малых или средних степеней деформации. А также заметное снижение их сопротивления при скорости деформации $2 \cdot 10^3 c^{-1}$.

Зависимости $e = f_2(\varepsilon)$ для исследованных марок стали имеют практически линейный характер при всех значениях температуры и скорости деформации.

Характер влияния скорости на сопротивление деформации анализировался с помощью скоростных коэффициентов. Были построены

зависимости скоростных коэффициентов от степени деформации при температурах 1073, 1273 и 1473 К. Скоростные коэффициенты определялись в виде отношений σ при $\dot{\varepsilon} = 5 \cdot 10^2 \text{ c}^{-1}$ и $\dot{\varepsilon} = 2 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ к σ при $\dot{\varepsilon} = 5 \text{ c}^{-1}$ при одинаковых значениях температуры и степени деформации. Анализ показал, что с повышением температуры возрастает интенсивность влияния скорости на сопротивление деформации: скоростные коэффициенты возрастают с повышением температуры от 1073 до 1473 К при всех степенях деформации (рис.4).

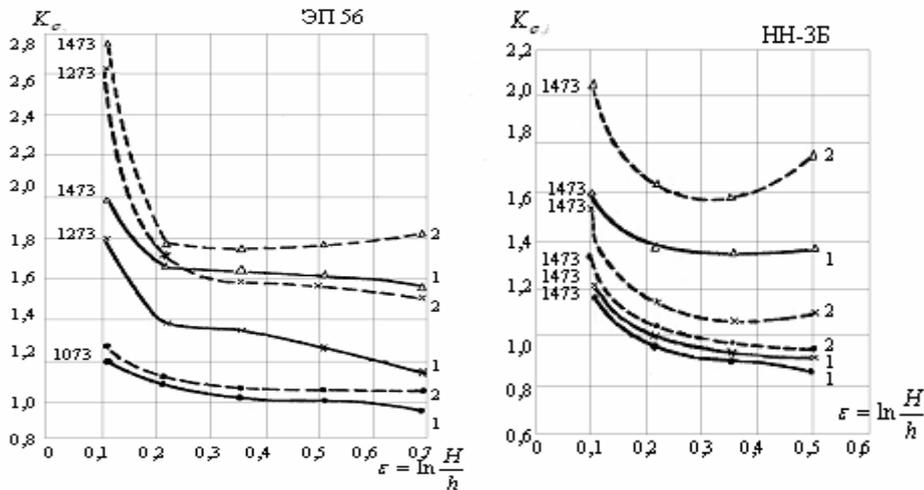


Рис. 4 Графики зависимости динамических коэффициентов $K_{\sigma,i}$ от степени деформации ε при различных температурах деформации. Стали: ЭП 56, НН-3Б.

$$1- K_{\sigma,1} = \frac{\sigma_{(500)}}{\sigma_{(5)}}; \quad 2- K_{\sigma,1} = \frac{\sigma_{(2000)}}{\sigma_{(5)}}.$$

Это связано с тем, что с повышением температуры возрастает интенсивность протекания разупрочняющих процессов в металле и, следовательно, увеличивается влияние скорости на сопротивление деформации. С повышением скорости деформации от 5 до $5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ максимальное возрастание деформации наблюдается при малых степенях деформации: скоростные коэффициенты имеют максимальную величину при $\varepsilon = 1$ при всех температурах нагрева. С повышением деформации и уменьшением температуры степень влияния скорости на сопротивление деформации уменьшается. При этом, величина скоростных коэффициентов исследованных сталей изменяется от 1,6...2,8 (при $T = 1473 \text{ K}$ и $\varepsilon = 1$) до 0,8...1,3 (при $T = 1073 \text{ K}$ и $\varepsilon = 0,4 \dots 0,5$) в зависимости от марки стали.

Указанный характер изменения скоростных коэффициентов от степени деформации объясняется действием инерционных сил и температурного эффекта деформации, особенностями механизма деформации металла при динамических нагрузках по сравнению со статическими и рядом других причин.

Для оценки действия сил инерции в процессе высокоскоростного деформирования определялась удельная работа, затраченная на сообщение радиальных и осевых ускорений частиц металла в объеме цилиндрической заготовки при горячей высокоскоростной осадке с различной начальной скоростью деформации. При этом использовались результаты аналитических

исследований Х.Метцлера и результаты экспериментальных исследований высокоскоростного процесса осадки, выполненных автором. Было установлено, что заметное влияние сил инерции на энергосиловые параметры процесса высокоскоростной осадки наблюдается при начальных скоростях деформации $\dot{\varepsilon} = 1000 \text{ c}^{-1}$. Так, например, при осадке цилиндрических заготовок с отношением $\frac{h_0}{d_0} = 1,33$ из стали ОХ18Н5Г12АБ при температуре

1273 К и начальных скоростях деформации $\dot{\varepsilon} = 1 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ величина отношения удельной работы инерционных сил к удельной работе деформации составляет 5...30 % в начальной стадии осадки ($\varepsilon = 1$) и уменьшается до 1...5 % в конечной стадии деформирования ($\varepsilon = 0,9$). Таким образом, в результате действия сил инерции возрастают работа и удельные усилия в начальной стадии высокоскоростной осадки по сравнению с более низкими скоростями деформации ($\dot{\varepsilon} = 5 \text{ c}^{-1}$), что приводит к повышению скоростных коэффициентов при малых степенях деформации. Схематически действие сил инерции при высокоскоростной осадке можно представить следующим образом: в начальный момент осадки происходит возрастание усилия, что объясняется тем, что частицам металла, находящимся в состоянии покоя, в малый промежуток времени сообщаются значительные ускорения; усилия в заключительной фазе деформирования при динамическом нагружении уменьшаются, так как аккумулированная в объеме заготовки кинетическая энергия расходуется на формоизменение.

Исследования, выполненные Г.Н.Эпштейном, показали, что при высокоскоростном деформировании металла наибольшее его упрочнение, вызванное действием вторичных систем скольжения, соответствует степени деформации $\varepsilon = 0,1 \dots 0,25$. При статическом нагружении вторичные системы скольжения вступают в действие при более высоких скоростях, причем с ростом деформации их удельный вес становится все больше, поэтому скоростные коэффициенты сопротивления деформации имеют максимальную величину при малых степенях деформации и уменьшаются с ее ростом.

Как указывалось С.И.Губкиным и Л.М.Шестопаловым, при высокоскоростном деформировании металла по сравнению со статическим нагружением при прочих равных условиях возрастает доля упругой деформации в полной деформации, особенно в начальной стадии деформирования, что объясняется отставанием скорости распространения пластической деформации и недостатком времени для релаксации напряжений. Это также приводит к повышению сопротивления деформации металла при малых степенях деформации при динамическом нагружении и, следовательно, к росту скоростных коэффициентов при деформациях.

Проведенный анализ влияния скорости на сопротивление деформации показал, что различные классы сталей обладают различной чувствительностью к скорости деформации. Установлено, что у аустенитных сталей (ОХ18Н5Г12АБ, ОХ20Н5АГ12МФ, 3Х19Н9МВБТ, Х18Н1ОТ) влияние скорости на сопротивление деформации в 1,2...1,4 раза меньше, чем у сталей мартенситного класса (10Х16Н4БА, Х17Н2) и ферритно-мартенситной стали

1X13. Исключения составляет мартенситная жаропрочная сталь 25X12H2B2M2Ф, у которой чувствительность к скорости деформации такая же, как у аустенитных сталей.

Это позволяет рекомендовать полученные значения скоростных коэффициентов для ориентировочного определения при высоких скоростях деформации ($\dot{\varepsilon} = 5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$) сопротивления деформации сталей аналогичных классов и близких по химическому составу к исследованным сталям, если известны значения сопротивления деформации при более низких значениях скорости ($\dot{\varepsilon} = 5 \text{ c}^{-1}$).

В результате обработки экспериментальных данных методами математической статистики получено, что для данной марки стали зависимости $\sigma = f_1(T, \dot{\varepsilon}, \varepsilon)$ и $e = f_2(T, \dot{\varepsilon}, \varepsilon)$ в определенных диапазонах изменения термомеханических параметров $(T, \dot{\varepsilon}, \varepsilon)$ можно представить в виде неполных квадратичных уравнений регрессии:

$$\sigma = b_0^\sigma + b_T^\sigma \cdot \frac{T}{T_{нл.}} + b_i^\sigma \cdot \lg \dot{\varepsilon} + b_\varepsilon^\sigma \cdot \varepsilon + b_{T\varepsilon}^\sigma \cdot \frac{T}{T_{нл.}} \cdot \lg \dot{\varepsilon} + b_{T\varepsilon}^\sigma \cdot \frac{T}{T_{нл.}} \cdot \varepsilon + b_{\varepsilon\varepsilon}^\sigma \cdot \lg \dot{\varepsilon} \cdot \varepsilon, \quad (8)$$

$$e = b_0^e + b_T^e \cdot \frac{T}{T_{нл.}} + b_{\dot{\varepsilon}}^e \cdot \lg \dot{\varepsilon} + b_\varepsilon^e \cdot \varepsilon + b_{T\dot{\varepsilon}}^e \cdot \frac{T}{T_{нл.}} \cdot \lg \dot{\varepsilon} + b_{T\varepsilon}^e \cdot \frac{T}{T_{нл.}} \cdot \varepsilon + b_{\varepsilon\varepsilon}^e \cdot \lg \dot{\varepsilon} \cdot \varepsilon. \quad (9)$$

Коэффициенты уравнений (8), (9) определены для всех исследованных марок сталей и диапазонов изменения термомеханических параметров. При построении уравнений регрессии производилась проверка значимости коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента и проверка адекватности принятых математических моделей по критерию Фишера, а также путем сравнения расчетных данных с экспериментальными. Относительная погрешность определения сопротивления и удельной энергии деформации по уравнениям (8), (9) не превышает 10 % по сравнению с экспериментальными данными, т.е. находится в пределах точности экспериментального определения этих параметров. Записанные уравнения (8), (9) могут быть использованы для практических расчетов сопротивления и удельной энергии деформации сталей при различных значениях термомеханических параметров.

При исследовании ТЭПД методом планирования эксперимента был реализован полный факторный эксперимент с варьированием переменных T , $\dot{\varepsilon}$, ε на двух уровнях. Исследовались стали ОХ18Н5Г12АБ, 25X12H2B2M2Ф, 10X16H4БА, 1X13, X17H2 и X18H1OT в следующих диапазонах изменения термомеханических параметров: $T = 1073 \dots 1273 \text{ K}$, $\varepsilon = 0,36 \dots 0,7$, $\dot{\varepsilon} = 5 \dots 5 \cdot 10^2 \text{ c}^{-1}$ (I диапазон) и $\dot{\varepsilon} = 5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ (II диапазон).

В результате получили для каждой марки стали и принятых диапазонов изменения термомеханических параметров зависимости $\Delta T = f(T, \dot{\varepsilon}, \varepsilon)$ в виде неполных квадратичных уравнений регрессии:

$$\Delta T = b_0^T + b_T^T \cdot \frac{T}{T_{нл.}} + b_{\dot{\varepsilon}}^T \cdot \lg \dot{\varepsilon} + b_\varepsilon^T \cdot \varepsilon + b_{T\dot{\varepsilon}}^T \cdot \frac{T}{T_{нл.}} \cdot \lg \dot{\varepsilon} + b_{T\varepsilon}^T \cdot \frac{T}{T_{нл.}} \cdot \varepsilon + b_{\varepsilon\varepsilon}^T \cdot \lg \dot{\varepsilon} \cdot \varepsilon. \quad (10)$$

На основании расчетов по уравнению (10) построены для всех исследованных марок стали графические зависимости $\Delta T = f(\varepsilon)$ при $T = 1073$ и 1273 K и $\dot{\varepsilon} = 5$ и $1 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$.

Средняя в объеме деформируемого металла величина ТЭПД определяется в основном химическим составом материала, степенью деформации и температурой нагрева и мало зависит от скорости деформации в исследованном диапазоне ее изменения. При температуре нагрева 1273 К, степени деформации $\varepsilon = 0,7$ и скорости деформации $\dot{\varepsilon} = 1 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ средняя величина ТЭПД изменяется от 298 до 333 К в зависимости от марки стали. В процессе высокоскоростного деформирования сталей ($\dot{\varepsilon} = 5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$), происходящего в условиях, близких к адиабатическим, температура в слоях скольжения имеет значения, гораздо большие тех температур деформационного нагрева, которые определялись экспериментально и являлись показателем средней температуры деформируемого объема металла. Повышение температуры в слоях скольжения активизирует релаксационные процессы и понижает уровень напряжений, необходимых для дальнейшего развития пластической деформации. С повышением степени деформации и уменьшением температуры нагрева влияние ТЭПД на сопротивление деформации возрастает.

В работе исследовалось влияние скоростных условий деформации на механические свойства и структуру сталей. Получено, например, что повышение начальной скорости деформации от 3 до $1 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ при температурах нагрева 1073...1523 К при прочих равных условиях вызывает некоторое измельчение структуры и повышение твердости деформированных образцов из сталей 3Х19Н9МБВТ и ОХ20Н5АГ12МФ. Аналогичные качественные результаты получены А.Г.Токаревым при динамических скоростях деформации ($\dot{\varepsilon}_0 = 1,6 \cdot 10^3 \dots 2,6 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$) сталей 1Х13 и 3Х19Н9МБВТ, по сравнению со статической скоростью деформации ($\dot{\varepsilon}_0 \approx 0,07 \text{ c}^{-1}$). Им также показано, что увеличение скорости деформации в указанных пределах при прочих равных условиях горячей деформации вызывает значительное возрастание энергии остаточных напряжений стали 3Х19Н9МБВТ и активизирует процессы ее рекристаллизации.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1) В результате исследования основных параметров процесса осадки проведенного в широком диапазоне изменения температурно-скоростных условий деформирования – установлены основные закономерности высокоскоростного деформирования специальных нержавеющих и жаропрочных сталей.

Получены количественные данные для расчетов режимов обжати и энергосиловых параметров процессов обработки давлением на высокоскоростном и обычном оборудовании.

2) Экспериментами установлено, что с повышением скорости деформации от 5 до $5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ в исследованных сталях значительное увеличение сопротивления деформации наблюдается в основном при малых степенях деформации. С ростом деформации и уменьшением температуры нагрева влияние скорости на сопротивление деформации заметно снижается. При этом, величина скоростных коэффициентов сопротивления деформации изменяется от 1,6...2,8 (при $T = 1473\text{K}$ и $\varepsilon = 0,1$) до 0,8...1,3 (при $T = 1073\text{K}$ и

$\varepsilon = 0,4..0,5$). У сталей ОХ18Н5Г12АБ, ОХ20Н5АГ12МФ, 3Х19Н9МБВТ, 25Х12Н2В2М2Ф и Х18Н10Т влияние скорости на сопротивление деформации в 1,2...1,4 раза меньше, чем у сталей 10Х16Н4БА, Х17Н2 и 1Х13.

3) При скоростях деформации $1 \cdot 10^3 \dots 2 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ предельная степень деформации (ε_{np}) сталей ОХ18Н5Г12АБ, ОХ20Н5АГ12МФ и 10Х16Н4БА увеличивается на 8...15% в интервале ковочных температур по сравнению со скоростью деформации $\varepsilon = 5 \text{ c}^{-1}$, а у стали 25Х12Н2В2М2Ф величина ε_{np} в исследованном температурно-скоростном диапазоне практически не изменяется. Механические свойства и структура сталей после горячей деформации при прочих равных условиях обработки давлением зависят от скорости деформации.

4) Средняя по деформированному объему величина температурного эффекта при горячем деформировании сталей определяется в основном их химическим составом, степенью деформации и температурой нагрева и мало зависят от скорости деформации в исследованном интервале ее изменения.

5) Полученные в работе экспериментальные данные могут быть использованы в качестве рекомендации и технологических инструкции для разработки технологических процессов штамповки исследованных сталей на высокоскоростном и обычном штамповочном оборудовании.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:

1. Садыков М.А. О высокоскоростной деформации стали ЭП 311 при повышенных температурах // Известия вузов МО КР.-2004.-№6.-С.37-39.
2. Садыков М.А. Об особенностях высокоскоростной деформации при повышенных температурах // Известия вузов МО КР.-2004.-№6.-С.124-128.
3. Сеитов Б.М., Садыков М.А. О некоторых особенностях высокоскоростной деформации конструкционных материалов при повышенных температур // Научно-технический и производственный журнал / Композиционные материалы.-№4.-Ташкент,2005.- Издательство НТК «Фан ва тараккийёт».-С.46-48.
4. Садыков М.А. О высокоскоростной деформации сталей при повышенных температур // Республиканская научно-техническая конференция / Новые технологии получения композиционных материалов на основе местного сырья и их применение в производстве.- Ташкент, 2005.-С.110-112.
5. Пазылов Ш.Т., Рудаев Я.И., Садыков М.А. Об анизотропии алюминиевых сплавов в условиях сверхпластичности // Динамика виброударных (сильно нелинейных) систем / XIII Симпозиум.- Москва – Звенигород, 2001.-С.78-79.
6. Садыков М.А. Об особенностях высокоскоростной деформации стали ЭП 56 при повышенных температурах // Материалы IV международной научной конференции / Прочность и разрушение материалов и конструкций.- Москва, 2005.- С.259-264.

7. Пазылов Ш.Т., Садыков М.А. К вопросу о закономерностях деформационной анизотропии алюминиевого сплава 1561 // Материалы международной конференции / Современные технологии и управление качеством в образовании, науке и производстве: опыт адаптации внедрения, Ч.1.-Бишкек,2001.-С.57-63.
8. Пазылов Ш.Т., Садыков М.А., Маткеримов Б.А. Об учете инерционных сил при высокоскоростной деформации в условиях повышенных температур // Материалы второй региональной научно-теоретической конференции / Современные проблемы науки, техники и образования.- Жалалабат,2003.-С.81-89.
9. Сеитов Б.М., Садыков М.А. Некоторые особенности высокоскоростной деформации сталей при повышенных температур // Международный научный журнал КУУ/ Наука, образования, техника.-№2(14).- Ош,2005.- С.145-149.
10. Пазылов Ш.Т., Садыков М.А. О некоторых закономерностях температурно -скоростной деформации качественных сталей // Сборник научных трудов ЖАГТИ, вып. 2.-Жалал-Абад, 2002.- 65-70.

«РЕЗЮМЕ»

Садыков Максат Амангелдиевич

«Закономерности высокоскоростной деформации специальных сталей при повышенных температурах»

Ключевые слова: высокоскоростное деформирование, сопротивление деформации, динамический коэффициент, удельная энергия деформации, температурный эффект пластической деформации.

Диссертационная работа посвящена исследованию закономерностей высокоскоростного деформирования высокопрочных нержавеющей и специальных сталей в интервале температур 1073...1473 К.

Получены общие закономерности высокоскоростного деформирования указанных сталей при повышенных температурах, установлено влияние скорости нагружения на показатели пластичности, сопротивления и удельной энергии деформации.

Для реализации технологических процессов объемного формоизменения рекомендованы высокоскоростные режимы деформирования соответствующих повышенным показателям пластичности исследованных сталей.

«РЕЗЮМЕ»

Садыков Максат Амангелдиевич

«Жогорку температурада атайын болотторду жогорку ылдамдык менен деформациялоонун закон ченемдүүлүктөрү»

Негизги сөздөр: жогорку ылдамдык менен деформациялоо, деформация каршылыгы, динамикалык коэффициент, деформациянын сыйымдуулук энергиясы, пластикалык деформациянын температуралык эффекти.

Диссертациялык иш 1073...1473 К температурада өтө бекем жана атайын болотторду жогорку ылдамдык менен деформациялоонун закон ченемдүүлүктөрүн изилдөөгө арналган. Керсетилген болоттордун жогорку

ылдамдык жана жогорку температурада деформациялоонун жалпы закон ченемдүүлүктөрү табылган. Деформациялоонун ылдамдыгынын чоюлчаактык керсеткічине, каршылыкка жанан деформациянын сыйымдуулук энергиясына тийгизген таасири аныкталган.

Келемдүү форма өзгөртүү технологиялык процесси ичин кересетилген болоттордун жогорку ылдамдык жана жогорку температурада деформациялоонун режимдери сунушталды.

«RESUME»

Sadykov Maksat Amangeldievich