

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ В ШИРОКИХ ДИАПАЗОНАХ ТЕМПЕРАТУР И СКОРОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИЙ

М.К.АЛДАШОВ, Б.М.СЕИТОВ

[E.mail. ksucta@elcat.kg](mailto:ksucta@elcat.kg)

*Конструктивдө болоттун кеңири диапозондуу температурада закон ченемдө изилденишинин эксперименти каралган.*

*Температура жана деформациянын тездигинен математикалык моделинин өзгөрүшүнөн болоттун тездик диапозону, кубулушу изилдөөнүн жыйынтыгында көрсөтүлөт. Кубулуштун себептери, жана закон ченемдөлүктөрү конструктивдө болоттун белгилүү бир температурада жана деформациянын тездигинде аныкталган.*

*Рассмотрена математическая модель для оценки процесса накопления необратимых деформаций с учетом изменения температур и скоростей деформации. Изложена техника эксперимента для исследования состояния конструктивных сталей в широких диапазонах температур и скоростей деформаций. Полученные результаты показывают, что в исследованных сталях существуют скоростные диапазоны и проявление сверхпластических свойств. Выявлены признаки сверхпластичности и закономерности деформаций конструктивных сталей при воздействии температур и скоростей деформаций.*

*The paper deals the natural searching experiment of constructive steel on a large diapason temperature. Because of the temperature and deformation speed mathematical model is changed at the result of searching the diapason speed of steel is described. The reasons of changing are determined at the speed of deformation.*

Математические модели деформируемых тел формулируются с привлечением физико-механических параметров на основе экспериментов, осуществляемых при однородных напряженно-деформируемых состояниях. В техническом решении для получения информации о поведении материалов при больших необратимых деформациях проще всего реализовать опыты на простое растяжение и сжатие. В этих опытах можно измерить силы и перемещения, которые позволяют вычислить напряжения и деформации. Поддержание скорости формирования в эксперименте и измерение температуры также

достаточно технически осуществимо и позволяет оценить несущую способность и прочность конструкции /1-7/ .

Представим детерминированные количественные зависимости для оценки процесса накопления необратимых деформаций с учетом изменения температур и скоростей деформаций в виде.

$$\sigma = \sigma(\theta, \dot{\epsilon}, \dot{\epsilon}), \quad (1)$$

где  $\sigma$  – действительное напряжение;  $\theta$  – абсолютная температура;  $\dot{\epsilon}$  – логарифмическая деформация;  $\dot{\epsilon}$  – скорость деформации.

Зависимость (1) строится путем замены переменных в функциях отклика, полученных по данным зафиксированных реализаций в опытах;

$$F = F(\theta, V, \Delta), \quad (2)$$

причем  $F$  – величина нагрузки на образец;  $V$  – скорость деформирования (скорость перемещения захватов испытательной машины);  $\Delta l$  – абсолютная деформация образца.

Между переменными, входящими в (1) и (2), имеется следующая связь:

– истинное напряжение

$$\sigma = \frac{F(L_0 + \Delta l)}{A_0 l_0}; \quad (3)$$

– логарифмическая деформация

$$\dot{\epsilon} = \ln(1 + \epsilon) = \ln \frac{l_0 + \Delta l}{l_0}; \quad (4)$$

– скорость деформации

$$\dot{\epsilon} = \frac{V}{l_0 + \Delta l}. \quad (5)$$

Здесь  $A_0, l_0$  – начальные площадь поперечного сечения и длина рабочей части образца;  $\epsilon$  – относительная деформация образца.

Таким образом, в принципе решение экспериментальной задачи сводится к исследованию состояния материала, представляемого зависимостью напряжения пластического течения от температуры, степени и скорости деформации.

Для проведения опытов над образцами при повышенных температурах и различных скоростях деформирования используется испытательная машина ZST 2/3, предназначенная для исследований высокотемпературной ползучести.

Вид и схематическое устройство машины ZST 2/3 и регистрирующих приспособлений показаны соответственно на рис. 1. К шпинделю нижнего захвата присоединена коробка скоростей 2 с электродвигателем 3, позволяющая осуществить в трубчатой печи 5

ступенчатое регулирование скорости перемещения нижнего захвата машины от  $2 \cdot 10^{-3}$  до  $3 \cdot 10^{-6}$  м/с<sup>-1</sup>. Для регистрации удлинения образца на станине машины закреплена упругая консольная балка 7 с тензорезисторами. При перемещении шпинделя нижнего захвата 1 консольный рычаг 8 прогибает балку 7. Сигнал с тензодатчиков поступает на тензометрический мост, питающийся от источников постоянного тока, и подается на вход одного из каналов графопостроителя Н306. Для измерения осевого усилия служат упругий элемент 10 с тензорезисторами, мостиковая схема тензоусилителя 11 и второй канал графопостроителя 9.

При нагружении испытуемого образца, осуществляемом с помощью коробки скоростей 2 и электродвигателя 3, вычерчивается диаграмма в координатах «нагрузка-абсолютная деформация».

Испытаниям предшествовала тщательная тарировка регистрирующих устройств по нагрузке, по величине перемещения нижнего захвата (координаты по вертикали и горизонтали самописца Н306), установление скорости перемещения нижнего захвата машины (скорости деформирования). При сопоставлении абсолютной деформации, замеренной на образцах после испытаний и рассчитанной по полученным диаграммам, было установлено их хорошее соответствие – расхождение ниже 5 %.

Температура, измеряемая двумя хромель-алюмелевыми термопарами 9 (рис. 1), фиксируется вторичным прибором многоточечным потенциометром КСП-4. Погрешность измерения температуры составляла  $\pm 3$  К.

При достижении необходимой температуры образцы помещаются в печь испытательной машины, выдерживаются в течение 20...30 мин, а затем подвергаются нагружению.

При испытаниях металлов на растяжение в условиях повышенных температур ГОСТ 9651-94 предъявляет следующие требования к испытательным камерам (печами), образцам и термопарам:

– предельные отклонения от установленной температуры испытания в точках замера по длине расчетной части образца без учета погрешностей измерения температуры, обусловленных термоэлектрическими преобразователями и вторичным прибором, не должны превышать  $\pm 5$  К (при нагреве до ГЗК);  $\pm 7$  К (873...1173 К);  $\pm 8$  К (1173...1473 К):

– продолжительность нагрева образца до температуры испытания должна составлять не более одного часа, время выдержки от 20 до 30 минут; число термопар две при рабочей длине образца  $l=100$  мм; при испытании образцов с начальной расчетной длиной  $l = 50$  мм допускается устанавливать одну термопару.

Более жесткие ограничения на предельные отклонения температуры в нагревательных печах устанавливают ГОСТ 3248-81 и ГОСТ 10145-81, регламентирующие методы испытаний металлов на ползучесть и длительную прочность. Допустимое отклонение от установившейся заданной температуры должно составлять не более  $\pm 3$  К (при нагреве до 983 К);  $\pm 4$  К (983... 1173 К). Верхняя температурная граница испытаний сталей не может превышать 1163 К.

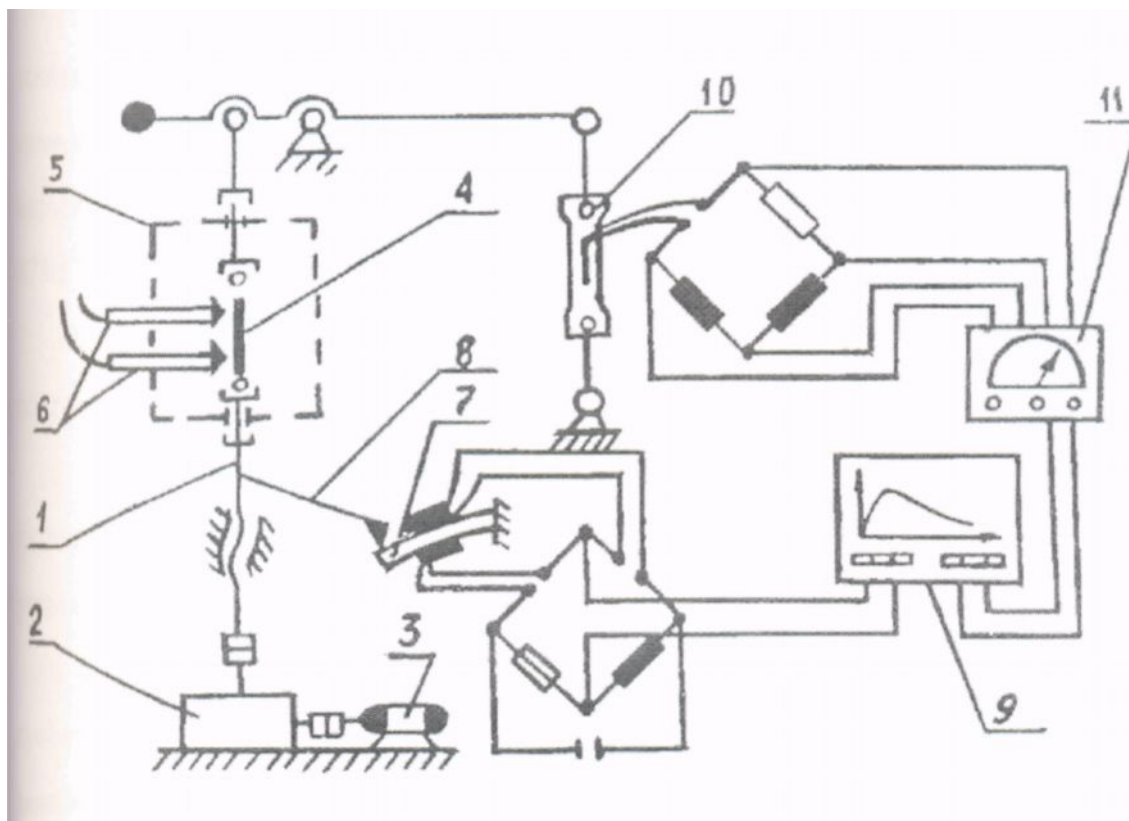


Рис. 1. Схема испытательной машины; 1 – шпindelь нижнего захвата; 2 – коробка скоростей; 3 – электродвигатель; 4 – образец; 5 – трубчатая печь; 6 – термопары; 7 – упругая балка; 8 – рычаг; 9 – графопостроитель; 10 – упругий элемент; 11 – тензоусилитель

Градуировка используемых в эксперименте хромель-алюмелевых термопар, изготовленных из стандартной проволоки диаметром 0,5 мм, доводилась в Кыргызском управлении Госстандарта. В диапазоне температур (673...773 К) их погрешность не превышала  $\pm 3$  К. Регистрация температуры проводилась поверенным многоточечным потенциометром КСП-4 модификации 41.560.50.009, имеющим класс точности 0,5 и пределы измерений шкалы (273...1373 К).

Перед началом температурно-скоростных испытаний проводилось сопоставление показаний используемых термопар, а также проверка стабильности этих показаний во

времени. С этой целью все пять хромель-алюмелевых термопар связывались в один пучок и опускались сверху в рабочий объем печи на глубину 150 мм (схема печи с соответствующими размерами отдельных участков приведены на рис. 1). Затем температура в печи доводилась до уровней 673, 723, 773 К и поддерживалась постоянной в течение одного часа. Через равные промежутки времени (5...6 минут) по потенциометру КСП-4 фиксировались показания каждой термопары. Результаты проверки стабильности показаний термопар, используемых в дальнейшем при температурно-скоростных испытаниях, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Проверка правильности показания термопар

N	Показания термопар $\theta, K$						
1	998	998	997	998	998	999	998
2	998	998	998	998	997	999	998
3	998	998	998	998	998	998	998
4	998	998	998	998	998	998	998
5	998	998	998	998	998	998	998
1	1003	1003	1003	1003	1003	1003	1003
2	1003	1003	1003	1003	1003	1003	1003
3	1003	1003	1003	1003	1003	1003	1003
4	1003	1003	1003	1003	1003	1003	1003
5	1003	1003	1003	1003	1003	1003	1003
1	1043	1043	1043	1043	1043	1043	1043
2	1043	1043	1043	1043	1043	1043	1043
3	1043	1043	1043	1043	1043	1043	1043
4	1043	1043	1043	1043	1043	1043	1043
5	1043	1043	1043	1043	1043	1043	1043

Проверка равномерности уровня температуры в рабочей части печи проводилась по показаниям всех пяти термопар при уровнях температуры (983...1163)К. С этой целью в пяти точках по высоте печи одного из блоков установки ZST2/3, на которой, как уже указывалось, проводились температурно-скоростные испытания, устанавливались термопары (рис. 2). Они захватывали область начального вложения образца и возможного удлинения его рабочей

части в процессе развития деформации. Положение термопар на рис. 2 показано цифрами 1, 2, ... , 5, взятыми в кружок.

В проушины верхнего и нижнего захватов испытательной установки вместо штанг с рабочим образцом, показанных на рис. 2, устанавливался длинный стержень диаметром 10 мм из материалов различных сталей, к которому с помощью имеющихся на кожухе перед каждым отверстием печи упругих креплений подводились концы термопар. Благодаря такому способу крепления рабочие концы термопар имели надежный контакт с поверхностью стержня. В качестве контрольной считалась вторая термопара, фиксирующая при дальнейших температурно-скоростных испытаниях температуру в средней части образцов. При достижении по контрольной термопаре соответствующего уровня температуры она поддерживалась постоянной в течение одного час. По КСП-4 визуально, а также по записи на диаграммной бумаге через равные промежутки времени фиксировались показания всех термопар.

Таблица 2

Показания температур в зависимости от места их расположения  
по высоте печи установки

М	Н	Показания термопар $\theta, K$						
2	2	1123	1123	1123	1123	1123	1123	1123
3	5	1123	1124	1124	1123	1122	1122	1122
4	4	1123	1123	1123	1123	1123	1123	1123
5	3	1123	1123	1124	1123	1124	1124	1124
2	2	1123	1123	1124	1123	1123	1123	1123
3	4	1123	1124	1123	1125	1125	1125	1125
4	3	1124	1124	1124	1124	1124	1124	1124
5	5	1123	1123	1123	1124	1124	1124	1123
2	2	1123	1123	1123	1123	1123	1123	1123
3	5	1123	1124	1124	1123	1122	1122	1122

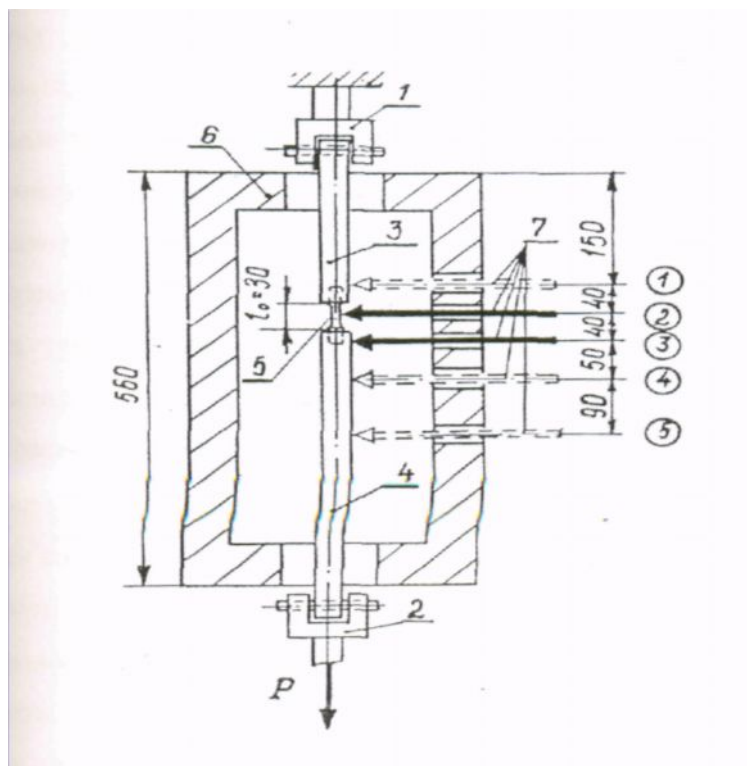


Рис. 2. Схема установки термопар по высоте нагревательного устройства:  
 1, 2 – верхний и нижний захваты; 3, 4 – штанги верхнего и нижнего захвата; 5 –  
 растягиваемый образец; 6 – нагревательная печь; 7 – верхняя и нижняя термопары

Стабильность показаний термопар проверялась на протяжении нескольких дней. При этом остальные термопары, за исключением контрольной, менялись местами. Ряд результатов измерения температуры различными термопарами приведен в табл. 2.

Проверка показала, что в рабочей части печи температура поддерживается достаточно стабильной и градиент температуры в области расположения термопар составляет (1...3) К/220 мм.

Для температурно-скоростного растяжения (ГОСТ 9651-84) использовались цилиндрические образцы с резьбовыми головками, имеющими длину рабочей части 30 мм и диаметр 6 мм. Температурный диапазон исследований в зависимости от марки сталей выбирался в пределах (983...163) К. Интервал измерений составляет (10...20) К.

Выбор диапазонов температур и скоростей деформирования диктовался предполагаемыми термомеханическими режимами проявления сверхпластических свойств. Химические составы исследованных сталей, установленные в состоянии поставки, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Химические составы исследованных сталей

Л' и/я	Марка стали	Химический состав (%)							
		C	Mn	S	P	Si	Cr	Ni	Mo
1	40	0,45	0,6	0,25	-	-	-	-	-
2	40X	0,45	0,64	-	-	-	0,96	-	-
3	У8	0,5	0,5	0,45	0,26	-	-	-	-
4	12ХНЗА	0,45	0,6	0,1	-	-	0,65	1,41	-
5	0,5КП	0,45	0,5	0,25	-	-	-	-	-

С целью установления основных прочностных, деформационных параметров и характера деформации в условиях нормальной температуры температурно-скоростным исследованиям предшествовали статические испытания образцов исследуемых сталей. Указанные испытания проведены на «реальной машине гидравлического типа 7Д-40».

Данные механических испытаний образцов сталей в нормальных условиях представлены в табл. 4.

Таблица 4

Механические испытания образцов сталей в нормальных условиях

№	Марка стали	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Удлинение $\epsilon < 5\%$
1	40	340	580	19
2	40X	800	1000	11
3	У8	420	610	14
4	12ХНЗА	700	950	11
5	0,5КП	190	400	20

Здесь  $\sigma_{0,2}$  – предел текучести;  $\sigma_B$  – предел прочности;  $\epsilon$  – остаточное относительное удлинение деформация.

Интервалы критических температур исследуемых сталей представлены в табл. 5.

Таблица 5

Интервалы критических температур исследуемых сталей



№	Марка стали	$A_c(\theta, K)$	$A_c(\theta, K)$
1	40	998	1063
2	40X	1008	1053
3	У8	1003	1043
4	12ХНЗА	983	1093
5	0,5КП	993	1163

$A_{c1}(\theta, K)$  – температура начала фазовых превращений;  $A_{c3}(\theta, K)$  – температура конца фазовых превращений.

Таким образом, исследование показали следующие закономерности конструкционных стали в широких диапазонах и температур и скоростей деформации.

1. В исследованных сталях существуют скоростные диапазоны, в которых изотермы «напряжение-скорость деформации» отклоняются от монотонного характера с появлением точек бифуркации. Ниспадающие ветви указанных грамм принимаются соответствующими проявлению сверхпластических свойств. Характерные признаки сверхпластичности – низкий уровень напряжений, высокая деформационная способность при растяжении – отмечаются в упомянутых диапазонах.

2. Сверхпластичность промышленных сталей объясняется происходящим при нагреве и деформации полиморфным превращением. В процессе последнего исходная деформированная или литая структура превращается в равноосную, мелкозернистую. Иными словами, находит подтверждение гипотеза о физической природе сверхпластичности как о суперпозиции деформации и одного или нескольких структурных превращений.

### Список литературы

1. Бекофен В. Процессы деформации. – М.: Металлургия, 1977. – 288 с.
2. Теория пластических деформаций металлов Под ред. Е.Н.Унксова, А.Г.Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1983. – 598 с.
3. Гуляев А.П. Сверхпластичность стали. – М.: Металлургия, 1982. – 56 с.
4. Смирнов О.М. Обработка металлов давлением в состоянии сверхпластичности. – М: Машиностроение, 1979. – 168 с.

5. Базык А.С., Тихонов А.С. Применение сверхпластичности в современной металлообработке. – М.: НИИМаш., 1977. – 64 с.

6. Смирнов О.М. Итоги и перспективы развития технологии обработки металлов давлением в состоянии сверхпластичности //КШП. – 1985. – № 8. – С. 16-17.

7. Рудаев Я.И. К вопросу математического моделирования сверхпластического растяжения // IV Всесоюзн. конф. «Сверхпластичность металлов» (Уфа, май 1989). Тез. докл., ч.1. – Уфа, 1989. – 16 с.