

нию удельных энергозатрат и расхода сырья, реконструкции оборотного цикла водоснабжения, снижению выбросов в атмосферу при применении современных технологий и оборудования, предусмотренных в проекте.

### Библиографический список

1. Сталинский Д. В., Рудюк А. С., Медведев В. С., Крюков Ю. Б., Бараненко В. С. Комплексное использование ресурсо- и энергосберегающих технологий при создании металлургических мини-заводов // Экология и промышленность. – 2012. – № 1. – С. 12-17.

2. Сталинский Д. В., Рудюк А. С., Медведев В. С. Ресурсосбережение и энергоэффективность в сортопрокатном производстве // Вестник национального технического университета «ХПИ». – 2011. – № 47. – С. 3-7.

3. Арих В. С., Кулак В. Ю. Использование современных технологий при строительстве новых и реконструкции существующих прокатных цехов, направленных на энерго- и ресурсосбережение // Экология, энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей среды и здоровье человека, утилизация отходов: сборник научных статей XV Международной научно-практической конференции, 4-8 июня 2007 г., г. Щелкино, АР Крым: в 2 т. Т. 1. / УкрГНПЦ «Энергосталь». – Харьков: «Издательство САГА», 2007. – С. 148-151.

Поступила 25.02.2014

УДК 621.7.011

Николаев В. А. /д. т. н./

ЗНТУ



Наука

## Напряжения течения стали при деформации в интервале температур 500-800 °С

На базе разработанных ранее автором методов расчета напряжения течения металла при горячей и холодной деформациях предлагается новый метод определения напряжения течения металла для условий «теплой обработки металлов давлением» при температурах 500-800 °С. Предложенный метод позволяет получать расчетные данные, близкие к практическим. Ил. 1. Табл. 1. Библиогр.: 16 назв.

**Ключевые слова:** напряжение, расчет, сталь, температура, деформация

*The new method of determination of tension of metal flow for the terms of «heat treatment of metals by pressure» at the temperature of 500-800 °С on the base of developed before by the author method of calculation of tension of metal flow at hot and cold deformations is suggested. The suggested method allows to get calculation information near to practical.*

**Keywords:** tension, calculation, steel, temperature, deformation

Напряжение течения металла является одной из основных механических характеристик, определяющих энергосиловые параметры обработки металлов давлением (ОМД). В процессе деформирования какого-либо изделия напряжение течения металла увеличивается от некоторой минимальной величины  $\sigma_{10}$  при относительном обжатии  $\varepsilon \approx 0$  до максимальной  $\sigma_{11}$  в конце деформации. В расчетных формулах для определения среднего нормального контактного напряжения  $p_{cp}$  (СНКН) в очаге деформации используют среднее значение напряжения течения металла  $\sigma_t$ . Напряжение течения металла  $\sigma_t$  отображает сопротивление элементарных частиц деформируемого металла внутренним перемещениям при некоторых величинах температуры ( $t$ ), степени ( $\varepsilon$ ), и скорости ( $u$ ) деформации, но при отсутствии влияния контактного трения.

Напряжения течения металла определяют только экспериментальным путем при деформации образцов осадкой на прессах (молотах) и деформации на пластометрах или на универсальных разрывных машинах. Сведения о результатах экспериментов и методах расчета напряжения течения металла при горячей деформации опубликованы в работах [1-11 и др.] а при холодной деформации в работах [4, 8, 12-16 и др.]

Из опубликованных работ следует, что напряжение течения металла (стали) можно определить расчетным путем при горячей деформации (главным образом при  $t = 800-1200$  °С) и при холодной деформации (при  $t = 20-300$  °С), но отсутствуют системные исследования и методы расчета напряжения течения для условий теплой обработки давлением стального металла при температурах  $t = 500-700$  °С. Некоторые данные по результатам исследований напряжения течения металла для ряда марок сталей приведены в монографии [6] (рисунок).

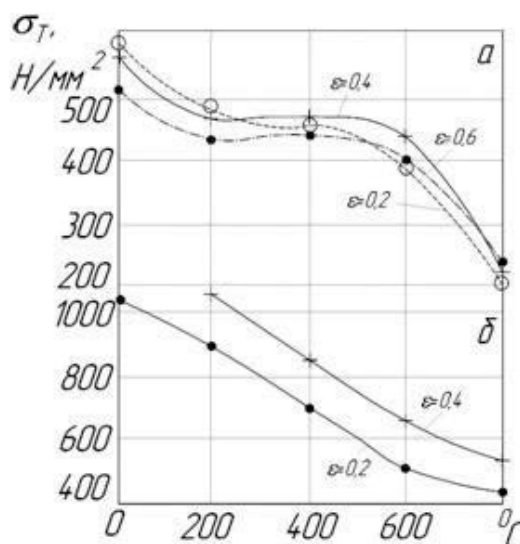


Рисунок. Влияние температуры и обжатия на напряжение течения металла: а - для стали 15 ( $u = 30 \text{ с}^{-1}$ ); б - для стали 1X25H22 ( $u = 312 \text{ с}^{-1}$ ) (0,12 С; 1,26 Si; 1,56 Mn; 25,49 Cr; 21,26 Ni). Опыты Suzuki [6]

Как следует из рисунка, температура металла в диапазоне 0-600 °С оказывает существенное влияние на напряжение течения металла (на упрочнение металла при уменьшении температуры). При этом упрочнение малоуглеродистой стали при уменьшении температуры с 600 °С до 0 °С несколько больше (в ~ 2,7 раза) (рис. 1 а), чем легированной (в ~ 2,35 раза) (рис.1 б). Наиболее интенсивно упрочнение малоуглеродистой стали имеет место в области температур 600-800 °С, где степень упрочнения составляет ~ 2,0. При деформации хромо-никелевой стали при одних и тех же обжатиях и температурах 600-800 °С степень упрочнения меньше, чем в случае деформации малоуглеродистой стали. Упрочнение металла происходит в основном при обжатиях  $\epsilon \leq 0,45-0,5$ , а при  $\epsilon > 0,5$  напряжение течения металла ( $t = 500-800 \text{ °С}$ ) возрастает в ~ 1,05-1,10 раза. Однако и в работе [6] отсутствуют сведения о методах расчета напряжения течения металла при температурах 500-800 °С.

Первые результаты экспериментальных исследований с рекомендациями метода расчета напряжения течения металла при температурах 800-1200 °С при различных обжатиях и скоростях деформаций были опубликованы М. А. Зайковым [1, 2] (некоторые эксперименты выполнены при  $t = 600$  и  $700 \text{ °С}$ ). В исследованиях М. А. Зайкова для различных марок сталей установлено, что при температурах 700 (800) °С и скоростях деформации  $u > 10^2 \text{ с}^{-1}$  изменение напряжения течения металла для различных марок сталей достаточно близко к линейным зависимостям. Подобный характер зависимостей  $\Phi = (t, \epsilon, u)$  подтверждается результатами исследований, приведенных и в других работах [3-7].

В настоящее время для расчета напряжения течения металла при горячей деформации используют методы Л. В. Андреюка-Г. Г. Тюленева [5], А. В. Третьякова-В. И. Зюзина [4]. В работе [11] отмечается, что большую точность опреде-

ления напряжения течения для различных марок стали обеспечивает метод [9, 10], разработанный на основе обобщения экспериментальных данных [4]. Метод расчета М. А. Зайкова [1, 2], в связи с определенными сложностями, не нашел широкого применения на практике, но результаты его исследований представляют большую ценность для совершенствования методов расчета напряжения течения металла. Предлагаемый ниже метод расчета напряжения течения металла (стали) при температурах 500-800 °С разработан на основе обобщения результатов исследований [1, 2, 4, 9, 10]. По аналогии с рекомендациями [1, 2, 4] принимаем следующую расчетную формулу для напряжения течения  $\sigma_T$ :

$$\sigma_T = \sigma_{T0} \cdot k_t \cdot k_\epsilon \cdot k_u \quad (1)$$

где  $\sigma_{T0}$  – базовое напряжение течения металла;  $k_t, k_\epsilon, k_u$  – термомеханические коэффициенты, учитывающие соответственно влияние температуры, относительного обжатия, скорости деформации.

Для расчета базового напряжения течения металла  $\sigma_{T0}$  при температурах 500-800 °С воспользовались выражениями из работ [9, 10] которые действительны для температуры  $t = 1000 \text{ °С}$ , относительного обжатия  $u = 0,1$  и скорости деформации  $u = 10 \text{ с}^{-1}$  и имеют вид:

для  $N_1 \leq 5$  (углеродистые, конструкционные, инструментальные, низколегированные стали):

$$\sigma_{T0}^1 = 80 + 25 \{ 1 - [(5 - N_1) / 4,5]^{1,8} \} \quad (2)$$

для  $N_2 > 5$  (легированные, высоколегированные стали):

$$\sigma_{T0}^1 = 110 + 38 [(N_2 - 2) / 32]^{0,25} N_2 \quad (3)$$

где  $N_1$  и  $N_2$  – содержание химических элементов в стали, % (кроме железа, серы и фосфора).

Применение для расчетов формул (2) и (3) позволяет, в соответствии с выполненным анализом в работе [11] получать результаты расчетов, близкие к практическим данным.

В первую очередь определим  $\sigma_{T0}$  в соответствии с новой базовой температурой, то есть для  $t = 800 \text{ °С}$  при  $\epsilon = 0,1$  и  $u = 10 \text{ с}^{-1}$ . Из формулы работ [9, 10] при  $t = 800 \text{ °С}$  получим

$$k_t = 1,66 - 1,1 [(t / 400) - 2]^{0,7} = 1,66.$$

То есть при уменьшении температуры с  $t = 1000 \text{ °С}$  до  $t = 800 \text{ °С}$  базовое напряжение течения металла  $\sigma_{T0}$  повышается в 1,66 раза, и тогда формулы (2), (3) примут вид:

для  $N_1 \leq 5$  (углеродистые, конструкционные, инструментальные, низколегированные стали)

$$\sigma_{T0} = 132 + 42 \{ 1 - [(5 - N_1) / 4,5]^{1,8} \} \quad (4)$$

для  $N_2 > 5$  (при  $N_2 \leq 32$ ) (легированные, высоколегированные стали)

$$\sigma_{т0} = 182 + 63 [(N_2 - 2) / 32]^{0,25} N_2 \quad (5)$$

Анализ результатов исследований [1, 2, 6] показывает, что в области температур 500-800 °С напряжение течения металла практически линейно увеличивается при уменьшении температуры. Обработка результатов исследований [1, 2] позволяет получить зависимость для определения коэффициента  $k_t$ . При этом коэффициент  $k_t$  определяем относительно температуры 800 °С при  $N_1 \leq 5$  и  $N_2 > 5$  и  $t \leq 800$  °С:

$$k_t = 1 + 3,6 (1 - t / 800) \quad (6)$$

Определим коэффициенты  $k_\varepsilon$  и  $k_u$  относительно базовых значений относительного обжатия  $\varepsilon = 0,1$  и скорости деформации  $u = 10$  с<sup>-1</sup> используя известные результаты исследований напряжения течения при горячей и холодной деформации металла. Анализом известных исследований [4, 8, 9, 10] установлено, что в области обжатий 0,1-0,5 упрочнение металла при горячей и холодной деформациях происходит по параболической зависимости, а максимальная степень упрочнения при  $\varepsilon = 0,5$  составляет:

1,36-1,64 - при горячей деформации;

1,36-1,78 - при холодной деформации,

то есть степень упрочнения металла практически не зависит от температурных условий деформации. В связи с полученными данными для деформации металла при температурах 500-800 °С используем зависимости, полученные в работах [9,10] ( $\varepsilon \leq 0,5$ ). Результаты исследований, представленных в работе [6] показывают незначительную степень упрочнения металла при температурах 500-800 °С если обжатие  $\varepsilon > 0,5$  В связи с этим, при обжатиях  $\varepsilon > 0,5$  коэффициент  $k_\varepsilon$ , полученный по формулам (7), следует умножить на величину 0,95-1,10:

Группа сталей		
I, II	$k_\varepsilon = 1 + 0,43[1 - 6,3(0,5 - \varepsilon)^2]$ ;	(7)
IV	$k_\varepsilon = 1 + 0,68[1 - 6,3(0,5 - \varepsilon)^2]$ ;	
III, VI, VII	$k_\varepsilon = 1 + 0,38[1 - 6,3(0,5 - \varepsilon)^2]$ ;	
V	$k_\varepsilon = 1 + 0,50[1 - 9(0,5 - \varepsilon)^2]$ .	

Марки сталей для групп I-VII представлены в табл. 1.

**Таблица. Группы сталей для расчета напряжения течения**

Группа сталей	Металл
I	Углеродистые и инструментальные стали 08кп; 08ю; 20; Ст3; 45; Ст6; У8-У10
II	Низколегированные и легированные стали 40Х; ШХ15; 15ХСНД; 14ГН; 12ХНЗА
III	20ХНМ; 60ХНГС2М; 30ХГСА; 18Х2Н4МВА; ХВГ; 60С2
IV	10ХН; 12Х17Н
V	20Х5НГ2; 15Х5М; 12ХНМФА; 20ХГНМ
VI	18ХГТ; 20ХГНР; 45ХН
VII	Высоколегированные стали 4Х13; Х16Н5М4; Х17Н2; Х18Н9Т; Х18Н12М2Т; Р18

Скорость деформации в области  $u = 10^{-2}-10^2$  с<sup>-1</sup> оказывает существенное влияние на напряжение течения металла при указанных выше температурах [1,2] При этом на величину напряжения течения металла заметное влияние оказывает также и химсостав деформируемого металла, что следует из приведенных ниже данных для  $t = 600$  °С и соответственно для  $u = 10^{-2}$  и  $10^2$  с<sup>-1</sup> (Н/мм<sup>2</sup>):

1. МСт.2 - $\sigma_t = 172$ и $361$ , - (2,03);	2. 20Х - $\sigma_t = 280$ и $653$ , - (2,33);
3. 60С2 - $\sigma_t = 428$ и $830$ , - (1,93);	4. 1Х13 - $\sigma_t = 289$ и $430$ , - (1,49).

В скобках для поз. 1-4 указаны отношения напряжений течения металла при максимальном и минимальном значениях скоростей деформации. Анализ и обработка опытных данных [1, 2] позволила установить зависимости  $\sigma_t = \Phi(u)$  и предложить расчетную модель для коэффициента  $k_u$ , учитывающего влияние скорости деформации для отдельных групп сталей:

для группы А:  $k_u = 0,87 + 0,056 \ln u$ ; (8)

группа сталей А - У8-У12, 1Х17Ю5, 15ХСНД, 1Х13, Х9С2, Р9, Р18, 30ХМ, 13НЗА, 12ХНЗА, 1Х18Н9, 1Х18Н9Т, Х14Н14В, Х14Н14ВГС, 1Х25Ю5, 20ХЗНЗА, 20ХНЗВ, Х12СФ14.

для группы В:  $k_u = 0,82 + 0,078 \ln u$ ; (9)

группа сталей В - углеродистые стали (содержание углерода С = 0,07-0,5), 20Х, 40Х, ШХ6-ШХ15, 17Х, Х28, 60С2, 30ХФ, Х12МФ, Н25, 30ХГСА, Х18Н12М2, 2Х18Н12М2Т, 4Х28С, 20ХГ, 2Х13, Х12М, Х23Н18, Х20Н14, Х18Н25,10Г2.

Таким образом, для расчета напряжения течения металла при температурах  $t = 500-800$  °С при относительном обжатии  $\varepsilon \geq 0,1$  и скорости деформации

$u = 10^2 - 10^2 \text{ с}^{-1}$  для различных марок сталей используют выражения (1, 4-9).

Оценка метода расчета напряжения течения выполнена по опытным данным [6, рис. 9] для стали с химсоставом: 0,08C; 0,26 Mn; 0,02 Si при температуре  $t = 600 \text{ }^\circ\text{C}$  и обжатии  $\varepsilon = 0,3$  при различных скоростях деформации. В результате получили:

$u, \text{ с}^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$	$10^0$	$10^1$	$10^2$
$\sigma_T, \text{ Н/мм}^2$ (опыт) –	160	202	265	330	421
$\sigma_T, \text{ Н/мм}^2$ (расчет) –	146	193	268	330	384

Как видно из сравнения, расчетные и опытные данные отличаются между собой не более, чем на 9 %, что свидетельствует о возможности применения предложенного метода расчета в практических целях.

Пример расчета по рис 1а: сталь 15 (группа 2),  $t = 600 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\varepsilon = 0,4$ ,  $u = 30 \text{ с}^{-1}$ .

Используем формулы (1), (4-9) (Н/мм<sup>2</sup>):

$$\begin{aligned} \sigma_{T0} &= 132 + 42 \{1 - [(5 - N_1) / 4,5]^{1,8}\} = 132 + 42 [1 - (4,33 / 4,5)^{1,8}] = 133; \\ k_1 &= 1 + 3,6(1 - t / 800) = 1,90; \quad k_2 = 1 + 0,43[1 - 6,3(0,5 - 0,4)^2] = 1,4; \\ k_{u1} &= 0,82 + 0,078 \ln u = 0,82 + 0,28 = 1,1; \\ \sigma_T &= \sigma_{T0} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_{u1} = 133 \cdot 1,9 \cdot 1,4 \cdot 1,1 = 388 \text{ Н/мм}^2. \end{aligned}$$

При опытном значении  $\sigma_T = 435 \text{ Н/мм}^2$  ошибка составляет всего – 10,8 %.

### Вывод

На основании анализа и обобщения результатов экспериментальных исследований, на базе известного расчетного метода, разработан метод определения напряжения течения металла при пластической деформации с температурами в области 500-800 °С, который может быть рекомендован для практического использования.

### Библиографический список

1. Зайков М. А. Режимы деформации и усилия при горячей прокатке. – М.: Металлургия, 1960. – 300 с.
2. Зайков М. А. Процесс прокатки. / М. А. Зайков, В. П. Полухин, А. М. Зайков, Л. Н. Смирнов // М.: МИСИС, 2004. – 640 с.
3. Динник А. А. Напряжения текучести при горячей деформации углеродистых и легированных сталей (Обработка металлов давлением. Сб. науч. тр. ДМетИ, ЛП) – М.: Металлургия, 1967. – С. 222-232.
4. Третьяков А. В., Зюзин В. И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке металлов давлением. – М.: Металлургия, 1973. – 358 с.
5. Андреюк Л. В., Тюленев Г. Г. Аналитическая зависимость сопротивления деформации от температуры, скорости и степени деформации // Сталь. – 1972. – № 9 – С. 825-828.
6. Полухин А. И., Гун Г. Я., Галкин А. М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1976. – 487 с.

7. Воробей С. А., Хижняк Д. Д., Левченко Г. В. Зависимость сопротивления стали от химического состава при горячей прокатке // Металл и литье Украины. – 1994. – № 9, 10. – С. 20-22.

8. Целиков А. И., Никитин Г. С., Рокотян С. Е. Теория продольной прокатки – М.: Металлургия, 1980. – 320с.

9. Николаев В. А. Расчет истинного предела текучести при горячей деформации металла // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 1999. – № 1. – С. 26-29.

10. Николаев В. А. Теория прокатки. – Запорожье: ЗГИА, 2007. – 228 с.

11. Яковченко А. В., Пугач А. А., Ивлева Н. И. Анализ точности известных методов расчета напряжения течения металла в зависимости от химического состава стали // Обработка металлов тиском. Зб. наук. праць. – Маріуполь: ПДТУ. – 2011. – № 2 (23). – С. 69-80.

12. Сигалов Ю. Б., Грудев А. П. Исследование и определение предела текучести стали с учетом температурно-скоростных условий при холодной прокатке. – К.: Техніка, Металлургия и коксохимия. – 1970. – № 23. – С. 63-69.

13. Сигалов Ю. Б., Соколов Ю. И., Головкин А. И. Изменение механических свойств стали при холодной прокатке. // Металлургия и коксохимия. – К.: Техніка. – 1973. – № 33. – С. 50-57.

14. Николаев В. А. Параметры прокатки полос при температурах 20-250 °С // Известия вузов. Черная металлургия. – 1978. – № 1. – С. 117-119.

15. Николаев В. А. Определение предела текучести при холодной деформации // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2000. – № 8, 9. – С. 152-154.

16. Николаев В. А. Напряжения течения при холодной деформации металла из горячекатаного подката. – Металл и литье Украины. – 2007. – № 3. – С. 25-28.

Поступила 16.09.2013

