

бойках. При этом использовали методику определения интенсивности деформаций по изменению размеров делительной сетки методом И.П. Ренне [5]. Для этого на свинцовую заготовку – диск диам. 85 мм и шириной 20 мм – на внутреннюю сторону наносилась прямоугольная делительная сетка с размерами сторон ячеек 3×3 мм с отклонением не более ±0,04 мм. После этого два диска складывались вместе и обжимались в специальном устройстве, обеспечивающем плоскую деформацию заготовки. Затем искаженная делительная сетка сканировалась и с помощью графического пакета AutoCAD и вычислительного пакета MathCAD выполнялись расчеты интенсивности деформаций по сечению заготовки, построение полей и графиков распределения интенсивности деформаций. Свинцовая заготовка подвергалась одностадийному и двухстадийному деформированию с теми же степенями обжатия, что и при компьютерном моделировании. Поля распределения интенсивности деформаций по сечению свинцовой заготовки представлены на рис. 1, б и 3, б.

Сравнивая левые и правые части этих рисунков, можно отметить, что результаты компьютерного моделирования по распределению интенсивности деформаций при одностадийном и двухстадийном деформировании круглой модели в комбинированных бойках достаточно близко совпадают с результатами экспериментальных исследований. Сравнение опытных данных с результатами компьютерного моделирования показало надежность последнего для решения задач обработки металлов давлением.

Выводы. При одностадийном обжатии поковки прокатных валков со степенью обжатия 14 % де-

формация распространяется на всю высоту поковки. Имеются зоны с низким значением интенсивности деформаций. После кантовки на 90° и повторной деформации с обжатием 11,0 % (двухстадийное деформирование) зоны с повышенной интенсивностью деформаций занимают большую площадь сечения поковки. Однако на боковых участках поковки интенсивность деформаций незначительна. Сравнивая значения интенсивности деформаций по результатам компьютерного и физического моделирования, можно отметить, что компьютерное моделирование адекватно описывает величину интенсивности деформаций при протяжке металла, обеспечивает необходимую точность расчетов и может быть использовано для решения технологических задач обработки металлов давлением.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Унксов Е.П. Инженерные методы расчета усилий при обработке металлов давлением. – М.: Машгиз, 1955. – 230 с.
2. Трубин В.Н., Гарновский И.Я. Ковка крупных поковок: Результаты исследования технологических режимов. – М., Свердловск: Машгиз, 1962. – 224 с.
3. Иванушкин П.Ф., Каргин Б.С. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1971. № 1. С. 96 – 100.
4. Алтыкис А.В., Колосков М.М., Назарян В.А. // Кузнечно-штамповочное производство. 1973. № 8. С. 3 – 8.
5. Ренне И.П. – В сб. трудов Тульского механического института «Технология машиностроения». – Тула: изд. ТМИ, 1966. С. 49 – 54.

© 2012 г. В.Н. Перетягко, С.А. Вахман,
М.В. Филиппова, А.Б. Юрьев
Поступила 1 марта 2012 г.

УДК 621.746.552.669.14 (0.43)

В.П. Антонов, Н.И. Таран, В.Я. Климов, Н.И. Швидков

Сибирский государственный индустриальный университет

РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА ТВЕРДОЙ ФАЗЫ ПРИ НУЛЕВОЙ ЖИДКОТЕКУЧЕСТИ СТАЛИ

Ю.А. Нехендзи [1] высказал предположение, что нулевую жидкотекучесть стали определяют 20 % твердой фазы в потоке. В более поздних работах им было высказано, что это количество может быть иным, но никто не исследовал зависимость количества твердой фазы ϵ_0 при нулевой жидкотекучести от содержания углерода в стали.

В результате совместного решения уравнений теплового баланса Ньютона и Бернулли, описывающего законы гидравлики при течении жидкости, получено выражение [2] для определения величина ϵ_0 по показаниям спиральной пробы на жидкотекучесть:

$$\epsilon_0 = \frac{(T_л - T_н) - k(T_2 - T_л)}{\left[(T_н - T_c) + (1 + \beta) \left(\frac{\rho}{c} \right) \right] (k - 1)}; \quad (1)$$

$$k = \frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{(1 + 0,0128 L_1)^{3/2} - 1}{(1 + 0,0128 L_2)^{3/2} - 1}, \quad (2)$$

где $T_л$ – температура ликвида; T_c – температура солидуса; β – относительная объемная усадка сплава при затвердевании; ρ – теплота кристаллизации сплава; c – удельная теплоемкость жидкого металла; τ_1, τ_2 – расчетное время течения металла по каналу пробы на расстояниях

L_1, L_2 равных жидкотекучести металла, при температурах на входе в канал соответственно T_1, T_2 .

Сталь с содержанием углерода от 0,1 до 1,0 % выплавлялась в 60-кг индукционной печи и заливалась в спиральные пробы, выполненные из песчано-глинистой формовочной смеси. Состав стали после охлаждения проб определялся химическим анализом. С одной плавки заливались две пробы: одна с перегревом примерно на 150 °С, другая – на 50 °С над линией ликвидуса.

Температуру (T_1, T_2) металла перед входом в канал измеряли вольфрам-рениевыми термопарами с незащи-

щенным спаем, показания которых фиксировались осциллографом Н041. Для расчета величины ϵ_0 для стали по уравнению (1) принимали $\beta = 0,05$ (5 %) независимо от содержания углерода [3]; $\rho = 64$ кал/г (268 кДж/кг) [4]; $c = 0,21$ кал/(г·°С) (880 Дж/(кг·К)) [4].

Экспериментальные и расчетные данные для определения количества твердой фазы ϵ_0 , останавливающего поток металла в зависимости от содержания углерода в стали, представлены в таблице.

Проведена математическая обработка экспериментальных данных с использованием пакета прикладных

Экспериментальные и расчетные данные для определения ϵ_0

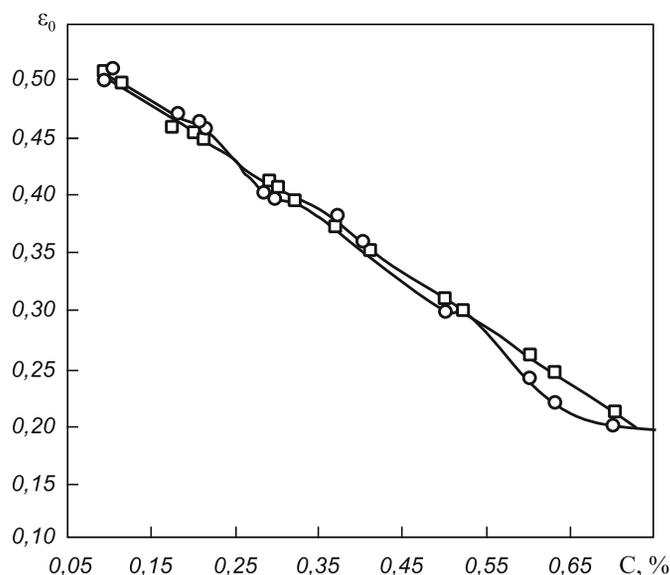
C, %	$T_{\text{зал}}, ^\circ\text{C}$	$\frac{T_1}{T_2}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{л}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{с}}, ^\circ\text{C}$	$\frac{L_1}{L_2}, \text{см}$	$\frac{\tau_1}{\tau_2}, \text{с}$	k	ϵ_0
0,09	$\frac{1680}{1590}$	$\frac{1641}{1553}$	1530	1521	$\frac{68,9}{49,0}$	$\frac{0,998}{0,679}$	1,469	0,50
0,10	$\frac{1680}{1585}$	$\frac{1641}{1548}$	1529	1519	$\frac{69,1}{48,2}$	$\frac{0,999}{0,667}$	1,496	0,51
0,11	$\frac{1675}{1580}$	$\frac{1636}{1543}$	1528	1517	$\frac{68,8}{47,5}$	$\frac{0,996}{0,657}$	1,515	0,50
0,18	$\frac{1670}{1570}$	$\frac{1631}{1534}$	1522	1502	$\frac{67,1}{45,0}$	$\frac{0,969}{0,619}$	1,564	0,47
0,20	$\frac{1675}{1570}$	$\frac{1636}{1534}$	1520	1498	$\frac{66,7}{45,8}$	$\frac{0,962}{0,631}$	1,583	0,46
0,21	$\frac{1670}{1570}$	$\frac{1631}{1534}$	1519	1496	$\frac{65,8}{46,4}$	$\frac{0,948}{0,640}$	1,561	0,46
0,29	$\frac{1665}{1575}$	$\frac{1626}{1538}$	1512	1480	$\frac{63,9}{43,7}$	$\frac{0,916}{0,599}$	1,527	0,40
0,30	$\frac{1660}{1570}$	$\frac{1621}{1534}$	1511	1478	$\frac{62,8}{42,9}$	$\frac{0,899}{0,588}$	1,529	0,40
0,32	$\frac{1665}{1575}$	$\frac{1626}{1538}$	1509	1474	$\frac{61,8}{42,6}$	$\frac{0,883}{0,583}$	1,514	0,40
0,37	$\frac{1650}{1560}$	$\frac{1612}{1524}$	1504	1463	$\frac{60,9}{40,9}$	$\frac{0,867}{0,556}$	1,559	0,38
0,40	$\frac{1655}{1550}$	$\frac{1617}{1514}$	1501	1457	$\frac{59,9}{36,8}$	$\frac{0,851}{0,496}$	1,715	0,36
0,41	$\frac{1660}{1550}$	$\frac{1621}{1514}$	1500	1455	$\frac{58,9}{33,1}$	$\frac{0,835}{0,442}$	1,888	0,35
0,50	$\frac{1650}{1545}$	$\frac{1611}{1509}$	1492	1437	$\frac{56,5}{33,3}$	$\frac{0,797}{0,446}$	1,787	0,30
0,52	$\frac{1650}{1540}$	$\frac{1611}{1504}$	1489	1433	$\frac{54,9}{31,5}$	$\frac{0,771}{0,419}$	1,837	0,30
0,60	$\frac{1645}{1540}$	$\frac{1607}{1504}$	1482	1417	$\frac{50,4}{28,0}$	$\frac{0,701}{0,369}$	1,900	0,24
0,63	$\frac{1630}{1535}$	$\frac{1592}{1499}$	1479	1410	$\frac{49,4}{27,7}$	$\frac{0,687}{0,365}$	1,880	0,22
0,70	$\frac{1630}{1530}$	$\frac{1592}{1494}$	1472	1396	$\frac{45,8}{24,5}$	$\frac{0,631}{0,320}$	1,968	0,20
0,82	$\frac{1610}{1520}$	$\frac{1572}{1484}$	1461	1371	$\frac{43,8}{25,0}$	$\frac{0,601}{0,327}$	1,838	0,20
0,90	$\frac{1605}{1510}$	$\frac{1567}{1475}$	1453	1355	$\frac{42,8}{24,0}$	$\frac{0,586}{0,313}$	1,871	0,20
1,07	$\frac{1590}{1485}$	$\frac{1553}{1450}$	1437	1320	$\frac{42,0}{22,0}$	$\frac{0,580}{0,286}$	2,025	0,20

программ STATGRAPHICS, который является программным продуктом фирмы STSC Inc и позволяет выполнить автоматизированный статистический анализ результатов исследований сложных стохастических (вероятностных) систем. Исследовалось влияние содержания углерода на показатель ϵ_0 .

В результате проведенного статистического анализа данных (количества твердой фазы от процентного содержания углерода в стали), введенных в программу, были получены две (линейная и экспоненциальная) наиболее близкие математические модели, описывающие зависимость количества твердой фазы ϵ_0 при нулевой жидкотекучести от содержания углерода в стали. Программа выбрала наиболее лучшую – линейную, которая адекватно и точно описывает эту зависимость, выраженную распечатками программы (см. рисунок). Экспериментальные данные и математические модели зависимости ϵ_0 от процентного содержания углерода в стали приведены ниже:

C, %	$\epsilon_{0\text{эксп}}$	$\epsilon_{0\text{расч (лин)}}$	$\epsilon_{0\text{расч (эксп)}}$
0,09	0,50	0,5072	0,5341
0,10	0,51	0,5024	0,5264
0,11	0,50	0,4975	0,5189
0,18	0,47	0,4638	0,4689
0,20	0,46	0,4541	0,4555
0,21	0,46	0,4493	0,4490
0,29	0,40	0,4107	0,3999
0,30	0,40	0,4059	0,3942
0,32	0,40	0,3962	0,3829
0,37	0,38	0,3721	0,3562
0,40	0,36	0,3577	0,3411
0,41	0,35	0,3528	0,3362
0,50	0,30	0,3094	0,2952
0,52	0,30	0,2998	0,2868
0,60	0,24	0,2612	0,2554
0,63	0,22	0,2467	0,2446
0,70	0,20	0,2129	0,2210

Примечание. $\epsilon_0 = 0,550607 - 0,482386C$; $R^2 = 97,94\%$ (линейная модель); коэффициент корреляции равен $-0,989643$; $\epsilon_0 = \exp(-0,497027 - 1,44634C)$; $R^2 = 96,82\%$ (экспоненциальная модель); коэффициент корреляции равен $-0,984887$.



Зависимость относительного количества твердой фазы ϵ_0 , останавливающего поток при течении по литниковым каналам, от содержания углерода в стали:
 —○— эксперимент; —□— линейная модель

Выводы. Проведенные эксперименты и расчеты показали, что количество твердой фазы при нулевой жидкотекучести стали зависит от содержания в ней углерода и изменяется линейно от $\epsilon_0 = 0,5$ (50 % твердой фазы в потоке) при 0,1 % C до $\epsilon_0 = 0,2$ (20 % твердой фазы в потоке) при 0,7 % C и выше.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нехендзи Ю.А. Стальное литье. – М.: Metallurgizdat, 1949. – 707 с.
2. Таран Н.И., Крестьянов В.И., Климов В.Я., Антонов В.П. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1999. № 12. С. 52 – 61.
3. Закономерности изменения объема и плотности серых чугунов при первичной кристаллизации / А.С. Басин, И.А. Васьков, Я.Л. Колотов, С.В. Станкус. – Новосибирск: АН СССР. Сибирское отделение. Институт теплофизики, 1980. – 50 с.
4. Вейник А.И. Теория затвердевания отливки. – М.: Машиностроение, 1960. – 435 с.

© 2012 г. В.П. Антонов, Н.И. Таран, В.Я. Климов, Н.И. Швидков
 Поступила 12 марта 2012 г.