УДК 669.14:539.3+621.785.72

Е.С. ГОЛУБЦОВА, д-р техн. наук (БНТУ),
Н.Б. КАЛЕДИНА (БГТУ),
Л.С. ШУМАНСКАЯ (БНТУ)

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОТПУСКА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ КВК26 (26Х2НВМБР)

Роль различных факторов (повышение плотности дефектов кристаллического строения, взаимодействие дислокаций с атомами углерода, ускорение процессов диффузии и др.) в упрочнении мартенсита после деформации в значительной мере определяется его структурой перед пластической деформацией. В свою очередь, структурные особенности деформированного мартенсита влияют на ход превращений при последующем отпуске. С этой точки зрения для развития представлений о факторах, обуславливающих упрочнение мартенсита при деформировании, и для выбора оптимальных условий осуществления деформации, необходимо изучение влияния на свойства стали предварительного и окончательного отпуска.

Низкотемпературный отпуск мартенсита (при 200 °С) перед деформацией оказывает влияние как на закономерности изменения прочностных и пластических свойств в диапазоне обжатий 5–20 %, так и на абсолютные значения пределов прочности и текучести, относительного удлинения и ударной вязкости.

Таким образом, степень развития деформационного старения во время деформирования зависит не только от степени деформации, но и от проведения предварительного отпуска [1].

С целью оценки влияния температуры предварительного отпуска (при 200 °С и 300 °С) и степени деформации ε на механические свойства закаленной стали КВК26 следующего химического состава, %: 0,26 C; 1,92 Cr; 0,76 Ni; 0,60 Si; 0,78 Mn; 0,18 Mo; 0,48 W; 0,03 Ti; 0,001 B; 0,008 P; 0,01 S, был проведен двухфакторный эксперимент по плану 2×3, где 2 – два уровня температуры отпуска до деформации (200 °С и 300 °С), а 3 – три уровня степени деформации ε = 10 и 20 %.

Закалка образцов этой стали проводилась при температуре 950 °С с охлаждением в масле. Деформацию производили плоской прокаткой за три прохода при ε = 10 % и пять проходов при ε = 20 %. Выдержка при отпуске составляла 4 ч.

Матрица плана и результаты эксперимента приведены в таблице 1, где $y_1 = \sigma_в$ – предел прочности, МПа; $y_2 = \sigma_{0,2}$ – предел текучести, МПа; $y_3 = \delta$, % – относительное увеличение; y_4 = KCU – ударная вязкость, кДж/м^2; x_1 и x_2 – кодированные уровни температуры отпуска ($x_1 = -1$, 200 °С, $x_1 = +1$, 300 °С) и степени обжатия ε ($x_2 = -1$, ε = 0 %; $x_2 = 0$, ε = 10 % и $x_2 = +1$, ε = 20 %).

Кодирование уровней факторов производили по формуле:

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - 0{,}5(\tilde{x}_{i\max} + \tilde{x}_{i\min})}{0{,}5(\tilde{x}_{i\max} - \tilde{x}_{i\min})}, \qquad (1)$$

где $\tilde{x}_{i\max}$ и $\tilde{x}_{i\min}$ – натуральные значения верхнего и нижнего уровней i-го фактора.

Таблица 1 – Матрица планирования и результаты эксперимента

	x_1	x_2	x_1x_2	x_2^2	$y_1 = \sigma_в$	$y_2 = \sigma_{0,2}$	$y_3 = \delta$	y_4 = = KCU	$y_5 = D$*
1	–	–	+	+	1547	1360	12,65	680	0,745
2	–	0	0	0	1708	1534	6,15	387	0,663
3	–	+	–	+	1880	1627	5,62	387	0,709
4	+	–	–	+	1480	1280	8,94	700	0,634
5	+	0	0	0	1640	1453	6,68	425	0,674
6	+	+	+	+	1747	1574	5,88	375	0,662
Σ_1	–268	600	–66	6654	10002	–	–	–	
Σ_2	–214	561	27	5841	–	8828	–	–	
Σ_3	–2,92	–10,1	3,97	33,1	–	–	45,92	–	
Σ_4	46	–618	–32	2142	–	–	–	2854	
* D – обобщенный параметр оптимизации									

Ошибки опытов соответственно составили:

S_{y_1} = 83,35 (5 % от среднего значения $\bar{y}_1 = \sigma_в$ = 1667 МПа); S_{y_2} = = 73,6 (5 % от $\bar{y}_2 = \sigma_{0,2}$ = 1471 МПа); S_{y_3} = 0,383 % (5 % от среднего

$\bar{y}_3 = \delta = 7{,}65\,\%$) и $S_{y_4} = 25$ (5 % от скорости значения $\bar{y}_4 = \mathrm{KCU} =$ $= 492$ кДж/м^2).

Опыты проводили в случайном порядке.

Статистическую обработку результатов эксперимента проводили по методике работы [2].

Коэффициенты предполагаемого уравнения регрессии вида $y_i = в_0 + в_1 x_1 + в_2 x_2 + в_{12} x_{11} x_2 + в_{11} x_1^2 + в_{22} x_2^2$ определяли по формулам:

$$в_0 = A_0(\mathrm{O}Y) - A_{01}(11Y) - A_{02}(22Y)\,; \tag{2}$$

$$в_1 = A_1(1Y) \cdot в_2 = A_2(2Y) \cdot в_{12} = A_{12}(12Y)\,; \tag{3}$$

$$в_{11} = A_{11}(11Y) - A_{01}(0Y) \cdot в_{22} = A_{22}(22Y) - A_{02}(0Y)\,, \tag{4}$$

где коэффициенты A_0; A_{01}; A_{02}; A_1; A_2; A_{12}; A_{11} и A_{22} берутся из [2, таблица 2.20]. Для плана 2×3: $A_0 = 0{,}5$; $A_{01} = 0$; $A_{02} = 5$; $A_1 = 0{,}16667$; $A_2 = A_{12} = 0{,}25$; $A_{11} = 0$; $A_{22} = 0{,}75$.

Выражения в скобках $(0Y)$;…$(22Y)$ – это алгебраические суммы произведений столбца y_i на соответствующие кодированные уровни столбцов x_1; x_2; x_1x_2 и x_2^2 (приведены в нижних строках матрицы Σ_1; Σ_2; Σ_3; Σ_4).

В результате получили следующие значения коэффициентов уравнения регрессии.

Для $y_1 = \sigma_в$: $в_0 = 1674$; $в_1 = 49{,}7$; $в_2 = 150$; $в_{12} = -16{,}5$; $в_{22} = -10{,}5$.

Для $y_2 = \sigma_{0,2}$: $в_0 = 1494$; $в_1 = -36$; $в_2 = 140$; $в_{12} = 7$; $в_{22} = -33$.

Для $y_3 = \delta$: $в_0 = 6{,}4$; $в_1 = -0{,}49$; $в_2 = -2{,}52$; $в_{12} = 1$; $в_{22} = -1{,}98$.

Для $y_4 = \mathrm{KCU}$: $в_0 = 406$; $в_1 = 7{,}67$; $в_2 = -155$; $в_{12} = -8$; $в_{22} = 130$.

Значимость этих коэффициентов определяли путем сравнения их абсолютных значений с их доверительными интервалами, которые рассчитывали по формуле:

$$\Delta в_i = \sqrt{A_i} \cdot S_y \cdot t\,, \tag{5}$$

где S_y – средняя квадратичная ошибка, t – критерий Стьюдента.

Критерий t берем из таблиц [3]. В нашем случае он равен 2,015 (при α = 0,1, n = 6).

Получили: для $y_1 = \sigma_\text{в}$; $\Delta в_1 = 68{,}5 > 49{,}7$; $\Delta в_2 = \Delta в_{12} = 84$;

$\Delta в_{22} = 145{,}5$, т.е. коэффициенты $в_1$, $в_{12}$ и $в_{22}$ незначимы. Тогда:

$$y_1 = \sigma_\text{в} = 1674 + 150x_2 . \qquad (6)$$

Для $y_2 = \sigma_{0,2}; \Delta в_1 = 60{,}5 > 36; \Delta в_2 = \Delta в_{12} = 74{,}1; \Delta в_{22} = 128{,}4 > 33$.

Здесь

$$y_2 = \sigma_{0,2} = 1494 + 140x_2 . \qquad (7)$$

Для $y_3 = \delta; \Delta в_1 = 0{,}315 < 0{,}487; \Delta в_2 = \Delta в_{12} = 0{,}386 < 0{,}52 < 1$:

$\Delta в_{22} = 0{,}669 < 1{,}9$, т.е. в этом случае все коэффициенты значимы $(\Delta в_i < в_i)$. Тогда

$$y_3 = \delta,\% = 6{,}4 - 0{,}487x_1 - 2{,}52x_2 + x_1x_2 + 1{,}9x_2^2 . \qquad (8)$$

Для $y_4 = \text{KCU}$; $\Delta в_1 = 20{,}6 > 7{,}67$; $\Delta в_2 = \Delta в_{12} = 25{,}2$; $\Delta в_{22} = 43{,}6 < 27{,}4$, т.е. коэффициенты $в_1$, $в_{12}$ и $в_{22}$ незначимы. Следовательно:

$$y_4 = \text{KCU} = 406 - 155x_2 + 130x_2^2 . \qquad (9)$$

Проверка адекватности уравнений (6)–(9) подтвердили эту гипотезу, поскольку критерии Фишера $F = \frac{S^2_\text{ад}}{S^2_y}$ ($S^2_\text{ад}$ – дисперсия адекватности равна $\sum\limits_1^s \Delta y_i^2 / N - m$, где m – число значимых коэффициентов (включая $в_0$) оказалось меньше табличного (критического) значения (при $\alpha = 0{,}01$, $f = N - m$ и $f_2 = N - 1$) и равно 16,3.

Действительно, для $y_1 = \sigma_в$ $F_1 = \frac{S^2_{ад}}{S^2_4} = \frac{3460{,}5}{83{,}35^2} = 0{,}5$ < 1; для $y_2 = \sigma_{0,2}$ $S^2_{ад} = 3123$ $F_2 = \frac{3123}{73{,}6^2} = 0{,}576$ < 1; для $y_4 = \mathrm{KCU}$ $S^2_{ад} = \frac{996}{6-3} = 332$; $F_4 = \frac{332}{25^2} = 0{,}531 < 1$.

Следовательно, уравнения (6), (7) и (9) адекватны при всех уровнях доверия α, т.к. $F < 1$.

Уравнение (8) адекватно при $\alpha = 0{,}01$.

Таким образом, повышение температуры отпуска перед деформацией (с 200 °С до 300 °С; $x_1 = -1$; $x_1 = +1$) не оказывает существенного влияния на пределы прочности, текучести и ударную вязкость ($\sigma_в$, $\sigma_{0,2}$ и KCU). Здесь решающую роль играет величина пластической деформации ε: чем она выше, тем больше значения $\sigma_в$, $\sigma_{0,2}$. Влияние степени деформации (x_2) на ударную вязкость (y_4 = KCU) существенно, но не столь велико как для $\sigma_в$, $\sigma_{0,2}$. Относительно низкие значения KCU после отпуска при 300 °С ($x_1 = +1$) можно объяснить развитием в этой стали явления необратимой отпускной хрупкости [4]. Деформация как бы нивелирует разницу в абсолютных значениях ударной вязкости после отпуска при 200 и 300 °С, что видно из таблицы 1 и уравнения (9).

Оба фактора (температура отпуска для деформации и степень пластической деформации) оказывают существенное влияние на величину относительного удлинения δ, но и в этом случае влияние второго фактора (ε, x_2) более весомо, чем влияние температуры отпуска (x_1). При предварительном отпуске 300 °С понижение относительного удлинения δ, вызываемое деформацией, происходит менее резко, нежели при отпуске 200 °С ($x_1 = -1$). Сравнительно низкие значения δ после отпуска при 300 °С ($x_1 = +1$) можно также объяснить развитием необратимой отпускной хрупкости. Можно полагать, что в процессе деформации в связи с появлением новых дефектов кристаллической решетки и их взаимодействием с углеродом происходит растворение части карбидов, и отрицательное влияние их неблагоприятного распределения в матрице в какой-то мере снижается.

Ввиду несколько противоречивого влияния температуры предварительного отпуска и степени пластической деформации на прочностные и пластические свойства закаленной стали КВК26, есть смысл использовать для выбора оптимальных условий обработки этой стали обобщенный параметр оптимизации [5] $D = \sqrt[4]{d_1 \cdot d_2 \cdot d_3 \cdot d_4}$, где d_1, d_2, d_3, d_4 – частные функции желательности для предела прочности ($y_1 = \sigma_в$), предела текучести ($y_2 = \sigma_{0,2}$); относительного удлинения ($y_3 = \delta$) и ударной вязкости (y_4 = KCU).

Составим таблицу 2 частных функций желательности для этих характеристик.

Таблица 2 – Частные функции желательности d_i для $\sigma_в$, $\sigma_{0,2}$, δ и KCU

Частная функция желательности, d_i	Кодированное значение показателя, y_i'	Предел прочности $y_1 = \sigma_в$, МПа	Предел текучести $y_2 = \sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение $y_3 = \delta$, %	Ударная вязкость y_4 = KCU, кДж/м^2
1,00–0,80 (очень хорошо)	3,000	1850	1750	10	650
0,80–0,63 (хорошо)	1,500	1700	1600	8	550
0,63–0,37 (удовлетворит.)	0,850	1550	1450	6	450
0,37–0,20 (плохо)	0,000	1400	1300	4	350
0,20–0,00 (очень плохо)	–0,500	1250	1150	2	250

Частные функции желательности d_i рассчитываем по формуле:

$$d_i = e^{-e^{-y_i'}} = \exp\left[-\exp(-y_i')\right], \qquad (10)$$

где y_i' – кодированные уровни параметров y_i.

Для нахождения кодированных уровней характеристик механических свойств y_i' воспользуемся графиком функции желательности, который построен с использованием данных таблицы 2.

Для кодирования частных характеристик механических свойств на оси абсцисс (оси y') рисунка возьмем три равномерных интервала: –3; –2; –1; 0; +1; +2; +3. С помощью формулы (10) найдем для каждого параметра частную функцию желательности d_i, подставляя в эту формулу кодированные значения y_i', т.е. 0; +1; +2; +3. По этим значениям d_i построим кривую функции желательности, приведенную на рисунке 1.

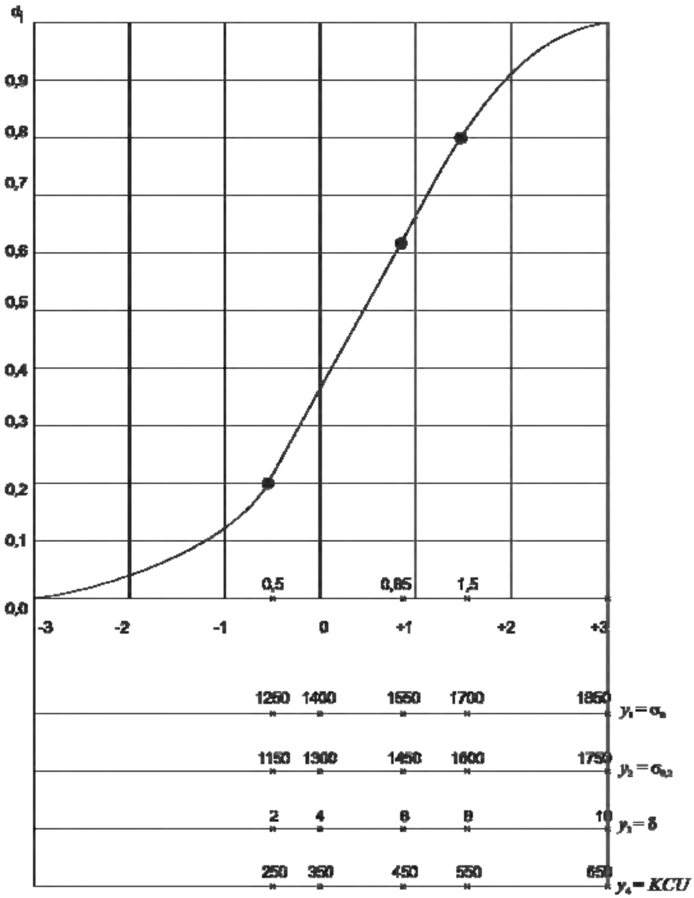

Рисунок 1 – График функции желательности

Проведя параллельно оси абсцисс (y'_i) четыре прямые, отложим на них натуральные значения частных параметров оптимизации ($\sigma_в$, $\sigma_{0,2}$, δ и KCU), соответствующие кодированным значениям таблицы 2.

В результате проведенных расчетов были получены для данных таблицы 1 следующие значения d_i и обобщенного параметра D, которые приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Натуральные значения величин d_i, $\sigma_в$, $\sigma_{0,2}$, δ, KCU и их функции желательности

N	$y_1 = \sigma_в$	$y_2 =$ $= \sigma_{0,2}$	$y_3 =$ $= \delta$	$y_4 =$ = KCU	d_1	d_2	d_3	d_4	D
1	1547	1360	12,65	680	0,630	0,490	1,000	1,000	0,745
2	1708	1534	6,15	387	0,813	0,742	0,666	0,481	0,663
3	1880	1627	5,62	387	1,000	0,842	0,624	0,481	0,709
4	1480	1280	8,94	700	0,530	0,340	0,895	1,000	0,634
5	1640	1453	6,68	425	0,750	0,657	0,711	0,590	0,674
6	1747	1574	5,88	375	0,870	0,780	0,638	0,449	0,662

Как видно из этой таблицы наибольшее значение $D = 0{,}745$ будет при $x_1 = -1$ (температура отпуска 200 °C) и $x_2 = -1$ ($\varepsilon \cong 0$ %).

Внесем значения D в таблицу 1 и, пользуясь данными этой таблицы и формулами (2)–(4), рассчитаем коэффициенты уравнения регрессии для $y_5 = D$.

Здесь $(0Y) = 4{,}087$; $(1Y) = -0{,}147$; $(2Y) = -0{,}008$; $(12Y) = 0{,}064$ и $(22Y) = 2{,}75$.

В результате получили: $в_0 = 0{,}669 \cong 0{,}67$; $в_1 = -0{,}026$; $в_2 = -0{,}002$; $в_{12} = 0{,}016$; $в_{22} = 0{,}019$. Доверительные интервалы $\Delta в_i$ для этих коэффициентов при ошибке опытов $S_5 = 0{,}034$ (5 % от среднего $\bar{y}_5 = D =$ $= 0{,}681$) будут соответственно равны: $\Delta в_1 = 0{,}028 > 0{,}025$;$\Delta в_2 = \Delta в_{12} =$ $= 0{,}034 > 0{,}016 > 0{,}008$; $\Delta в_{22} = 0{,}059 > 0{,}019$.

Следовательно, коэффициенты $в_1$, $в_2$; $в_{12}$ и $в_{22}$ незначимы и уравнение регрессии будет таким:

$$y_5 = D = 0{,}67 . \qquad (11)$$

Таким образом, на обобщенный параметр оптимизации D оба фактора (температура отпуска и степень деформации) не оказывают существенного влияния, поскольку полученные значения D в строках не отличаются от D = 0,67 при ошибке эксперимента S_5 = 0,034.

Адекватность уравнения (11) подтверждается величинами дисперсии адекватности ($S^2_{ад}$ = 0,0017142) и критерия Фишера F, равного $F = \frac{0{,}0017142}{0{,}039^2} = 1{,}483 < F_{кр} = 5{,}1$ при $\alpha = 0{,}05$; $f_1 = 5$ и $f_2 = 5$.

Анализ полученных результатов таблицы 1 и уравнений (6)–(9) показывает, что между исследованными характеристиками механических свойств стали КВК26 существует корреляционная связь. Действительно, после расчета величины коэффициента парной корреляции по формуле [5]

$$r_{ij} = \frac{\sum_1^n (y_i - \bar{y}_i)(y_j - \bar{y}_j)}{\sqrt{\sum_1^n (y_i - \bar{y}_i)^2 (y_j - \bar{y}_j)^2}} \tag{12}$$

получили следующие значения этих коэффициентов: $r_{1,2}$ = 0,98; $r_{1,3}$ = –0,627; $r_{1,4}$ = –0,862; $r_{2,3}$ = –0,762; $r_{2,4}$ = –0,989; $r_{3,4}$ = 0,945.

В формуле (12) y_i и y_j – i-я и j-я характеристики; $\bar{y}_i$ и $\bar{y}_j$ – их средние значения; n – число опытов (у нас n = 6).

Напомним, что $y_1 = \sigma_в$, МПа; $y_2 = \sigma_{0,2}$, МПа; $y_3 = \delta$, %; $y_4 = KCU$, кДж/м^2. Табличное (критическое) значение коэффициента парной корреляции $\tau_{кр} = 0{,}621$ при α = 0,1 и n = 6, т.е. все вычисленные коэффициенты парной корреляции больше $r_{кр}$, что подтверждает вывод о тесной корреляционной связи между $\sigma_в$, $\sigma_{0,2}$, δ и KCU в виде уравнений типа $y_j = в_0 + в_1 y_i$.

Расчет коэффициентов корреляционного уравнения произведем по формулам:

$$в_1 = \frac{\sum_1^n (y_i - \bar{y}_i)(y_j - \bar{y}_j)}{\sum_1^n (y_i - \bar{y}_i)^2}; \qquad (13)$$

$$в_0 = \bar{y}_j - в_i \bar{y}_i. \qquad (14)$$

Таким образом, связь между характеристиками механических свойств можно представить в виде следующих уравнений:

$$y_2 = \sigma_{0,2} = 0{,}904\sigma_в - 35{,}4; \qquad (15)$$

$$y_3 = \delta = 27{,}43 - 0{,}012\sigma_в; \qquad (16)$$

$$y_4 = KCU = 2032 - 0{,}924\sigma_в; \qquad (17)$$

$$y_3 = \delta = 30{,}6 - 0{,}0156\sigma_{0,2}; \qquad (18)$$

$$y_4 = KCU = 2070 - 1{,}0726\sigma_{0,2}; \qquad (19)$$

$$y_4 = KCU = 110{,}41 + 50\delta. \qquad (20)$$

В связи с этим вместо четырех параметров ($\sigma_в$, $\sigma_{0,2}$, δ и KCU) можно выбрать один (параметр $\sigma_в$), а значения других можно рассчитать с помощью этих корреляционных уравнений (15)–(17).

Определив подобным образом коэффициенты парной корреляции между $\sigma_в$ и остальными характеристиками, можно полученные результаты расчетов r_{ij} свести в таблицу 4.

Таблица 4 – Значения коэффициентов парной корреляции $r_{1,2}$; $r_{1,3}$; $r_{1,4}$; $r_{2,3}$; $r_{2,4}$; $r_{3,4}$

y_i / y_j	$y_1 = \sigma_в$	$y_2 = \sigma_{0,2}$	$y_3 = \delta$	$y_4 =$ = KCU	Корреляционные уравнения
1 $\sigma_в$	–	0,98	–0,627	–0,862	$\sigma_{0,2} = 0{,}904\sigma_в - 35{,}4$
2 $\sigma_{0,2}$	0,98	–	–0,762	–0,989	$\delta = 27{,}43 - 0{,}012\sigma_в$
3 δ	–0,627	–0,762	–	0,945	$KCU = 2032 - 0{,}924\sigma_в$
4 KCU	–0,862	–0,989	0,945	–	$\delta = 30{,}6 - 0{,}0156\sigma_{0,2}$

Таким образом, если мы хотим получить высокое значение предела прочности, например, $\sigma_в$ = 1900 МПа, то мы должны знать, что предел текучести $\sigma_{0,2}$ в этом случае будет равен 1682 МПа, относительное удлинение δ = 4,63 %, а ударная вязкость KCU = = 276 кДж/м^2, т.е. сталь КВК26 будет обладать низкими пластическими свойствами.

Полученные результаты эксперимента, регрессионные и корреляционные уравнения позволяют сделать вывод, что степень развития деформационного старения во время деформирования предварительно отпущенного мартенсита мало зависит от проведения предварительного отпуска (x_1). Повышение температуры отпуска до 300 °С (x_1 = +1) практически не влияет на прочностные свойства и оказывает незначительное влияние лишь на относительное удлинение δ, снижая его величину по сравнению с отпуском при 200 °С. Относительно низкие значения δ и KCU непосредственно после отпуска при 300 °С объясняются, как указывалось выше, развитием в стали необратимой отпускной хрупкости.

Литература

1. **Шамиев, С.Ш.** Влияние отпуска на механические свойства и тонкую структуру закаленных и деформированных сталей / С.Ш. Шамиев // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1966. – № 4. – С. 15–18.

2. **Вознесенский, В.А.** Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В.А. Вознесенский. – М.: Статистика, 1974. – 192 с.

3. **Большев, Л.Н.** Таблицы математической статистики / Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов. – М.: Наука, 1965. – 152 с.

4. **О влиянии** пластической деформации на состояние твердого раствора углерода в мартенсите закаленной стали / В.П. Вылежнев [и др.] // Физика металлов и металловедение. – 1967. – Т. 24. – № 1. – С. 186–188.

5. **Голубцова, Е.С.** Основы научных исследований в порошковой металлургии и сварке / Е.С. Голубцова, Б.А. Каледин, Н.Б. Каледина. – Минск: БНТУ, 2008. – 240 с.