

Разработка математической модели интегрированной деформационно-термической обработки для прогнозирования механических свойств прокатываемых арматурных профилей

^{1*}**ДЖАКСЫМБЕТОВА Макпал Адилкановна**, докторант, dzhaxymbetova_ma@enu.kz,

¹**КАНАЕВ Амангельды Токешевич**, д.т.н., профессор, aman-kanaev2012.@yandex.ru,

¹Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина, Казахстан, 010011, Нур-Султан, пр. Женис, 62,,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Цель исследования – разработка математической модели интегрированной деформационно-термической обработки для прогнозирования механических свойств прокатываемых арматурных профилей. Методы исследования – экспериментальное изготовление образцов, оценка механических свойств, металлографический анализ, моделирование. В условиях совмещения горячей прокатки с последующей высокотемпературной термической обработкой особого внимания заслуживают особенности формирования зеренной структуры в процессе параллельно идущих рекристаллизационных явлений. Аналитический обзор литературных данных по проблеме совмещения горячей деформации с термической обработкой показывает, что эффективность деформационно-термической обработки зависит от температуры прокатки, суммарной степени и дробности деформации, степени единичных деформаций, интервала времени с момента окончания горячей прокатки до начала ускоренного охлаждения, продолжительности интенсивного охлаждения, определяющей температуру самоотпуска, типа исходной заготовки (литая или катаная) и, наконец, химического состава обрабатываемой стали. Механические свойства сортового проката из углеродистой стали обыкновенного качества (Ст.5) путем совмещенной деформационно-термической обработки могут быть повышены до уровня механических свойств горячекатаной низколегированной стали типа 35ГС. Механические свойства конструкционных легированных и высоколегированных сталей могут быть достигнуты совмещенной деформационно-термической обработкой низколегированных сталей с экономией дорогих и дефицитных легирующих элементов. Получены уравнения регрессионных моделей предела прочности и относительного удлинения. Данные уравнения позволяют прогнозировать возможные уровни прочности (σ_B) и пластичности (δ_5) в готовом прокате после совмещенной деформационно-термической обработки при заданных уровнях температуры деформации, последеформационной паузы (времени выдержки от конца деформации до начала интенсивного охлаждения) и продолжительности интенсивного охлаждения. Эти уравнения могут служить исходной предпосылкой для прогнозирования конечных механических свойств при разработке и внедрении промышленной технологии производства деформационно-термически упрочненных арматурных профилей.

Ключевые слова: углеродистая сталь, деформационно-термическая обработка, арматурный профиль, закатка, форсунка, структурообразование, уравнение регрессии.

Введение

Аналитический обзор литературных данных и современного состояния конечной прокатной продукции показывает, что наиболее перспективным и эффективным способом повышения качества массовых видов сортового проката является совмещенная деформационно-термическая обработка. Наиболее рациональным путем осуществления упрочняющей термической обработки проката является интенсивное охлаждение прокатных изделий на выходе из последней чистовой

клетки прокатного стана.

Деформационно-термическая обработка как эффективный и экономичный способ улучшения качества и конкурентоспособности металлических материалов разрабатывалась применительно к качественным средне- и высокоуглеродистым и легированным сталям. К настоящему времени в разработке теории и технологии деформационно-термической обработки этих сталей достигнуты впечатляющие успехи, которые привели к созданию прогрессивных технологических про-

цессов, в основе которых лежат изменения структуры и свойств металла при совмещении горячей пластической деформации и термической обработки. Этого нельзя сказать о рядовых низкоуглеродистых сталях обыкновенного качества, долгое время считавшихся, что их нельзя упрочнять термической обработкой (закалкой).

Учитывая, что деформационно-термическое упрочнение представляет собой совмещенный процесс термического упрочнения с деформационным, можно утверждать, что если к описанному выше термическому упрочнению низкоуглеродистых сталей добавить еще и деформационное, то причина сильного упрочнения этих (ранее считавшихся незакаливаемыми) сталей получает вполне логическое научное объяснение.

Экспериментальные исследования показывают, что в зависимости от условий проведения горячей прокатки (температуры, степени и скорости деформации, длительности последеформационной паузы, продолжительности интенсивного охлаждения) может быть достигнут широкий набор структурных состояний: от горяченаклепанного до рекристаллизованного. Отсюда следует, что изучение особенностей структурообразования при деформационно-термическом упрочнении и создание на этой основе (как в ходе, так и по окончании горячей деформации) наиболее предпочтительной структуры имеет важное, а в ряде случаев – определяющее значение.

Материалы и методы

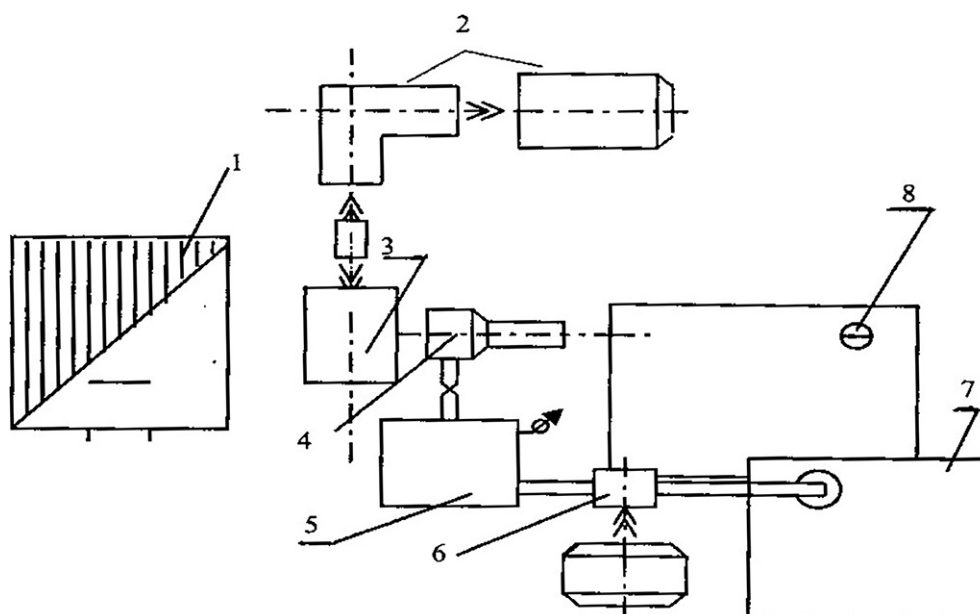
Рассмотрение результатов исследований структуры и субструктуры и свойств низкоугле-

родистых (Ст.3, Ст.5 всех степеней раскисления) и низколегированных (типа 35ГС) сталей показывает, что структурообразование в деформационно-термически упрочненных арматурных и угловых профилях является сложным процессом, зависящим от большого числа факторов. Кроме природы сплава (химический и фазовый состав, тип решетки, плотность и распределение дефектов структуры, прежде всего дислокаций), характер структурных изменений зависит от условий деформации и термической обработки.

Для того чтобы смоделировать ход деформационно-термической обработки и составить уравнение регрессии для прогнозирования итоговых прочностных и пластических свойств арматурных профилей, была сформирована особая лабораторная установка, включающая в себя следующие основные части (см. рисунок).

Исходными заготовками для эксперимента были овальные раскаты, выбранные перед чистовым проходом мелкосортного стана 300 в момент прокатки соответствующих арматурных профилей путем нарезки на аварийных ножницах, установленных перед чистовой клетью стана. Прокатный стан имеет привод с двигателем переменного тока мощностью 15 кВт с числом оборотов 768 об/мин и оснащен специальными проводками для соответствующей подачи и выдачи прокатанных проб.

Охлаждающее устройство представляет собой нагнетающую форсунку с камерой охлаждения (рисунок), в которую охлаждающая вода подается из специального герметически закрытого резервуара, куда вода поступает насосом под



1 – электрическая нагревательная печь, 2 – электропривод прокатного стана, 3 – прокатный стан дуо «190», 4 – охлаждающее устройство с прямоточными и противоточными форсунками, 5 – аккумулятор охлаждающей воды, 6 – водяной насос высокого давления, 7 – резервуар для технической чистой воды, 8 – ванна для сброса охладителя
Схема лабораторной экспериментальной установки для деформационно-термической обработки

давлением до 15 атм. В насос техническая вода поступает из резервуара-отстойника. Сброс отработанной воды производится в сборник. Форсунка с камерой охлаждения устанавливается в двух положениях относительно движения металла: в попутном и противоположном направлениях. При этом в охлаждающем устройстве создается противодействие и интенсифицируется процесс охлаждения движущегося проката. Такая схема подачи воды позволяет исключить отсечку воды при прохождении концов раската и обеспечить постоянство ее по всей длине профилей. Проведенные опытно-промышленные эксперименты по деформационно-термической обработке арматурных профилей показали, что охлаждающее устройство с прямоточной и противоточной форсунками имеет бесспорные преимущества как по простоте конструкции, так и по эксплуатационной надежности.

Для нагрева образцов перед прокаткой использовали камерную электрическую печь с силовыми нагревателями с максимальной температурой нагрева металла 1250°C. Регулирование температуры нагревательной печи можно производить в двух режимах: с ручным и автоматическим управлением. Температуру рабочего пространства печи контролировали с помощью платино-платинородиевой термопары с погрешностью $\pm 5^\circ\text{C}$, температуру нагретого металла измеряли оптическим пирометром «Проминь» с погрешностью $\pm 10^\circ\text{C}$. После проведения экспериментов полученные образцы арматурных профилей испытывали в лаборатории металловедения для определения механических свойств в стандартных условиях. Отдельные механические испытания дублировали методом неразрушающего контроля образцов из готовых профилей феррозондовым коэрцитиметром КИФМ-1, который основан на принципе устойчивых корреляционных связей между механическими и магнитными характеристиками проката.

Наряду с фазовыми превращениями, определяющими процессы структурообразования при совмещенной деформационно-термической обработке, одним из основных способов регулирования тонкой структуры сплавов и формирования ряда важнейших структурно-чувствительных свойств является горячая пластическая деформация, в частности, горячая прокатка. Следует подчеркнуть, что совмещение горячей пластической деформации с последующей упрочняющей термической обработкой кардинально меняет зеренную и субзеренную структуру сплава и дает возможность управлять процессами структурообразования и получить оптимальные физико-механические свойства в готовых изделиях.

Действующие технологические процессы производства арматурных профилей на конкретных прокатных станах характеризуются большим разнообразием диапазона указанных температурно-временных и деформационно-термических

параметров, различные сочетания которых приводят к совершенно различным механическим свойствам даже для одной и той же марки стали и для одного и того же вида и размера прокатываемого профиля, что обуславливает чрезвычайную трудность, а часто и практическую невозможность разработки единых математических моделей прогнозирования конечных механических свойств готового проката для различных сортов и типов станов [1]. Применительно к арматурным профилям диаметром 12-16 мм математическую модель совмещенной деформационно-термической обработки арматурных профилей из углеродистой стали разрабатывали с учетом особенностей существующей технологии:

- деформационные, скоростные и температурные режимы горячей прокатки арматурных профилей заданы в определенных жестких границах их изменения в соответствии с действующей на стане калибровкой валков;

- конечной целью совмещенной деформационно-термической обработки проката является замена горячекатаных арматурных профилей класса прочности А-111 из низколегированной стали марки 35ГС (ГОСТ10884-96) на упрочненную из рядовой углеродистой стали марки Ст5, что обеспечивает значительную экономию ферромарганца и ферросилиция и существенно облегчает саму технологию выплавки и прокатки этой стали.

С учетом этих особенностей в качестве объекта исследования выбраны арматурные профили из углеродистой и низколегированной сталей марок Ст.5сп и 35ГС.

Результаты исследования

Исследование проводили традиционным методом активного эксперимента [2], для чего был выбран план полного факторного эксперимента при наличии трех варьируемых факторов на двух уровнях. Параметрами оптимизации были приняты: предел прочности при испытании на разрыв – σ_b (МПа) и относительное удлинение – δ_5 (%).

Варьируемыми факторами являются:

- 1) температура металла при прокатке – t °C (X_1), которая измерялась оптическим пирометром в момент задачи металла в валки;

- 2) пауза с момента выхода металла из валков до начала интенсивного охлаждения – Δt , сек. (X_2), определяемая с помощью секундомера с точностью 0,25 с;

- 3) продолжительность интенсивного охлаждения – τ , с (X_3).

Учтено влияние различных способов охлаждения и типа исходной заготовки (литая или катаная заготовка).

В таблице 1 представлены матрица планирования и результаты эксперимента при деформационно-термическом упрочнении арматурного профиля № 12 из углеродистой стали Ст.5сп. Ин-

Таблица 1 – Матрица планирования и результаты эксперимента при совмещенной деформационно-термической обработке арматурных профилей № 12 из углеродистой стали Ст.5сп

Факторы и функции отклика	Температура прокатки, t , °C	Пауза от конца прокатки до начала интенсивного охлаждения, Δt , сек	Продолжительность интенсивного охлаждения, τ , сек	Взаимодействие факторов				Параметры оптимизации	
				$t * \Delta t$, ($X_1 X_2$)	$t * \tau$, ($X_1 X_3$)	$\Delta t * \tau$, ($X_2 X_3$)	$t * \Delta t * \tau$ ($X_1 X_2 X_3$)	Предел прочности, σ_b	Относит. удлинение, δ_5
Основной уровень (0)	1030	10	3						
Интервал варьирования	60	10	1						
Верхний уровень (+1)	1090	20	4						
Нижний уровень (-1)	970	0	2						
1 опыт	+	+	+	+	+	+	+	1510	8,3
2 опыт	-	+	+	-	-	+	-	1480	17,4
3 опыт	+	-	+	-	+	-	+	1530	8,0
4 опыт	-	-	+	+	-	-	+	1520	18,0
5 опыт	+	+	-	+	-	-	-	1210	6,0
6 опыт	-	+	-	-	+	-	+	1500	3,2
7 опыт	+	-	-	-	-	+	+	1370	1,5
8 опыт	-	-	-	+	+	+	-	1410	9,4
Коэффициенты b_i для σ_b	-36,25	-16,25	+68,75	-28,75	+46,25	+1,25	+33,75		
Коэффициенты b_i для δ_5	-3,03	-0,25	+3,95	+1,45	+1,75	+0,175	-1,23		

тенсивное охлаждение проводилось в форсунке с кольцевой щелью со встречным движением потока воды по отношению к направлению движения металла в момент охлаждения при давлении воды 0,15 МПа (15 атм.). Эксперименты проводились с учетом рандомизации.

Необходимо рассчитать коэффициенты модели:

$$b_i = \sum X_{iu} Y_u / N, \quad (1)$$

где i – номер фактора,

u – номер опыта,

N – число опытов в матрице планирования,

X_{iu} – значение фактора в u -м опыте,

Y_u – значение параметра оптимизации в том же опыте.

Коэффициент модели b_0 для предела прочности рассчитывали из серии восьми опытов по плану полного факторного эксперимента ПФЭ – 2^3

$$b_0 = (1510 + 1480 + 1530 + 1520 + 1210 + 1500 + 1370 + 1410) / 8 = 1441,25.$$

Коэффициент модели b_0 для относительного

удлинения

$$b_0 = (8,3 + 17,4 + 8,0 + 18,0 + 6,0 + 3,2 + 1,5 + 9,4) / 8 = 8,98.$$

Значения остальных коэффициентов b_i для предела прочности – σ_b и для относительного удлинения – δ_5 представлены в конце таблицы 1 (строки 13 и 14).

Для определения дисперсии S_y^2 на основном уровне ставилась серия из 5 опытов, по результатам которых оценивалась S_y^2 . Для предела прочности она равнялась $S_y^2 = 391,7$; а для относительного удлинения $S_y^2 = 2,42$.

Среднеквадратическая ошибка этих дисперсий равна соответственно:

$$\text{для предела прочности} - S = \pm \sqrt{S_y^2} = \pm 19,79;$$

$$\text{для относительного удлинения} - S = \pm \sqrt{S_y^2} = \pm 1,55.$$

Уравнения регрессионных моделей предела прочности – σ_b и относительного удлинения – δ_5 для совмещенного деформационно-термического упрочнения имеют вид:

$$\sigma_b = 1441,25 - 36,25X_1 - 16,25X_2 + 68,75X_3 - 28,75X_1X_2 + 46,25X_1X_3 + 1,25X_2X_3 + 33,75X_1X_2X_3, \quad (2)$$

$$\delta_5 = 8,98 - 3,03X_1 - 0,25X_2 + 3,95X_3 + 1,45X_1X_2 - 1,75X_1X_3 + 0,175X_2X_3 - 1,23X_1X_2X_3. \quad (3)$$

Проверку значимости коэффициентов уравнения регрессии выполнили по критерию Стьюдента, доверительный интервал по которому оказался равным [3]:

для предела прочности $-\Delta b_i = \pm 22,26$;

для относительного удлинения $-\Delta b_i = \pm 1,75$.

Сравнив абсолютные величины коэффициентов уравнения регрессии с доверительным интервалом и отбросив коэффициенты, меньшие по величине доверительного интервала (статистически незначимые коэффициенты), получаем следующие уравнения регрессии:

$$\sigma_b = 1441,25 - 36,25X_1 + 68,75X_3 - 28,75X_1X_2 + 46,25X_1X_3 + 33,75X_1X_2X_3, \quad (4)$$

$$\delta_5 = 8,98 - 3,03X_1 + 3,95X_3 - 1,75X_1X_3 + 0,175X_2X_3. \quad (5)$$

В этих уравнениях значения факторов (таблица 1) представлены в кодированном масштабе, которые рассчитываются из соответствующих значений в натуральном масштабе по формулам:

$$X_1 = ([t, ^\circ\text{C}] - 1030) / 60, \quad (6)$$

$$X_2 = ([\Delta\tau, \text{сек}] - 10) / 10, \quad (7)$$

$$X_3 = ([\tau, \text{сек}] - 3) / 1, \quad (8)$$

Если, например, требуется определить предел прочности при температуре прокатки 1050°C , паузе 15 с и продолжительности интенсивного охлаждения 2,5 с, то в уравнение (4) следует подставить эти значения: $X_1 = 0,33$; $X_2 = 0,5$; $X_3 = -0,5$.

Соответственно предел прочности и относительное удлинение после деформационно-термического упрочнения при этом режиме составляет: $\sigma_b = 1375$ МПа; $\delta_5 = 6,3$.

Однако прежде чем пользоваться уравнениями (4) и (5), необходимо проверить гипотезу об их

адекватности.

Проверка адекватности модели.

Расчетные значения $\sigma_{b \text{ расч.}}$ определяли из уравнения регрессии. Например, условия третьего опыта были следующими (таблица 2):

$$X_1 = +1; X_2 = -1; X_3 = +1;$$

$$X_1X_2 = -1;$$

$$X_1X_3 = +1;$$

$$X_1X_2X_3 = -1.$$

Следовательно, расчетное значение σ_b для первого и третьего опыта равно $\sigma_{b \text{ расч.}} = 1515$.

Дисперсия неадекватности [4] определяется по формуле

$$S_{\text{неадек.}}^2 = \sum (\sigma_{b \text{ расч.}} - \sigma_{b \text{ эксп.}}) / N - k = 2125 / 8 - 6 = 2125 / 2 = 1062,5, \quad (9)$$

где k – число значимых коэффициентов в уравнении регрессии.

Расчетное значение критерия Фишера, позволяющее проверить гипотезу об адекватности модели опытным данным, определяется по уравнению:

$$F_{ff}^{\text{расч.}} = S_{\text{неадек.}}^2 / S_y^2 = 1062,5 / 391,7 = 2,71, \quad (10)$$

где S_y^2 – дисперсия опыта, определенная с $f_1 = 4$ числом степеней свободы.

Табличное значение критерия Фишера (F -критерия) при 5% уровне значимости составляет [5] $F_{2,4}^{\text{табл.}} = 6,94$.

Поскольку $F_{\text{расч.}} < F_{\text{табл.}}$, то гипотеза об адекватности уравнения регрессии (4) не отвергается и им можно пользоваться для прогнозирования механических свойств (предела прочности) при деформационно-термическом упрочнении арматурных профилей диаметром 12 мм из углеродистой стали Ст.5сп.

Проверка адекватности регрессионного уравнения (2.5) производится вычислением критерия неадекватности

$$S_{\text{неадек.}}^2 = 7,39 \text{ и расчетного критерия Фишера.}$$

$F_{4,4} = S_{\text{неадек.}}^2 / S_y^2 = 3,05$ и сравнением расчетного значения критерия Фишера ($F_{\text{расч.}}$) с табличным значением критерия Фишера ($F_{\text{табл.}}$) при уровне

Таблица 2 – Схема расчета дисперсии неадекватности для модели предела прочности

№	σ_b экспериментальное	σ_b расчетное	$\Delta\sigma_b = \sigma_b \text{ эксп.} - \sigma_b \text{ расч.}$	$(\Delta\sigma_b)^2$
1	1510	1525	15	225
2	1480	1495	15	225
3	1530	1515	15	225
4	1520	1505	15	225
5	1210	1227,5	17,5	306,5
6	1500	1517,5	17,5	306,5
7	1370	1352,5	17,5	306,5
8	1410	1392,5	17,5	306,5
				$\Sigma(\Delta\sigma_b)^2 = 2125$

значимости $\alpha = 0,05$.

$$F_{\text{табл.}} = 6,39, \text{ следовательно, } F_{\text{расч.}} < F_{\text{табл.}}$$

Это означает, что гипотеза об адекватности регрессионного уравнения (5) не отвергается и им можно пользоваться для прогнозирования механических свойств (относительного удлинения) при деформационно-термическом упрочнении арматурного профиля диаметром 12 мм из углеродистой стали Ст.5сп.

Вывод. Полученные уравнения регрессии для определения σ_b и δ_5 будут использованы в качестве рабочей гипотезы для предварительного расчета ожидаемых механических свойств готового арматурного проката после деформационно-термического упрочнения при заданных уровнях варьируемых факторов: температуры конца прокатки, паузы от конца прокатки до начала интенсивного охлаждения и продолжительности самого интен-

сивного охлаждения.

Вследствие того, что лабораторные эксперименты проводились применительно к условиям последнего чистового прохода мелкосортного стана 300, в полученных математических моделях под температурой прокатки имеется в виду практически температура конца прокатки, которая при совмещенной деформационно-термической обработке является температурой закалки. Поскольку эксперименты проводились при содержаниях углерода и марганца, равных $C = 0,32\%$ и $Mn = 0,65\%$, что соответствует среднему содержанию этих элементов в стали Ст.5сп согласно ГОСТ 380-96, то колебания содержания этих элементов в реальных производственных плавках в пределах, допускаемых требованиями данного ГОСТа, не будут существенно сказываться на результатах определения конечных механических свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Канаев А.Т. Повышение качества сортового проката деформационно-термической обработкой. – Павлодар: Арман-ТВ, 2009. – 180 с.
2. Дурнев В.Д., Сапунов С.В., Федюкин В.К. Экспертиза и управление качеством промышленных материалов. – СПб: Питер, 2004. – 254 с.
3. Узлов И.Г. Развитие теории и технологии термического и термомеханического упрочнения конструкционных сталей // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сборник научных трудов. – 2004. – № 8. – С. 250-260.
4. Сафьян А.М. Новые инновационные технологии производства сортового проката // Там же. – 2006. – № 12. – С. 175-178.
5. Kanayev A.T., Barizhanova D.S. Deformative and thermic strengthening of moving corner profilrs in the stream of rolling machine // Materialy IV Mezinarodni vedecko-prakticka conference PREDNI VEDECKE NOVINKY – 2008. Praha. – 2008. – P. 52-55.

Иленетін арматуралық профильдердің механикалық қасиеттерін болжау үшін интегралданған деформациялық-термиялық өңдеудің математикалық моделін жасау

^{1*}**ДЖАКСЫМБЕТОВА Макпал Адилкановна**, докторант, dzhaxymbetova_ma@enu.kz,

¹**КАНАЕВ Амангельды Токешевич**, т.ғ.д., профессор, atan-kanaev2012.@yandex.ru,

¹С. Сейфуллин атындағы қазақ агротехникалық университеті, Қазақстан, 010011, Нұр-Сұлтан, Жеңіс даңғылы, 62,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Зерттеудің мақсаты иленетін арматуралық профильдердің механикалық қасиеттерін болжау үшін интегралданған деформациялық-термиялық өңдеудің математикалық моделін жасау. Зерттеу әдістері – сынамаларды тәжірибелік жолмен алу, механикалық қасиеттерін бағалау, металлографиялық талдау, модельдеу. Ыстық илемдеуді одан әрі жоғары температуралы термиялық өңдеумен біріктіру жағдайында параллель жүретін қайта кристалдану құбылыстары процесінде түйіршікті құрылымды қалыптастыру ерекшеліктері аса назар аударуға тұрарлық. Ыстық деформацияны термиялық өңдеумен біріктіру мәселесі бойынша әдеби деректердің аналитикалық шолуы деформация-термиялық өңдеудің тиімділігі илемдеу температурасына, деформацияның қосынды дәрежесі мен бөлшектілігіне, бір деформация дәрежесіне, ыстық илемдеу аяқталған сәттен бастап жеделдетілген салқындаудың басталуына дейінгі уақыт аралығына, өздігінен босату температурасын анықтайтын қарқынды салқындату ұзақтығына, бастапқы дайындаманың түріне (құйылған немесе илектелген) және, сайып келгенде, өңделген болаттың химиялық құрамына байланысты болатындығын көрсетеді. Кәдімгі сападағы көміртекті болаттан жасалған сұрыптық илемнің механикалық қасиеттері (5-бап) біріктірілген деформациялық-термиялық өңдеу арқылы 35ГС типті ыстықтау илектелген төмен қоспаланған болаттың механикалық қасиеттері деңгейіне дейін көтерілуі мүмкін. Конструкциялық қоспаланған және жоғары қоспаланған болаттың механикалық қасиеттеріне қымбат және тапшы қоспалағыш элементтерді үнемдеу арқылы, төмен қоспаланған болатты біріктіріп деформация-термиялық өңдеу арқылы қол жеткізуге болады. Беріктік шегі мен салыстырмалы ұзарудың регрессиялық модельдерінің теңдеулері алынды. Бұл теңдеулер деформация температурасының берілген деңгейлерінде біріктірілген деформация-термиялық өңдеуден кейін, деформациядан кейінгі үзілістен (дефор-

мацияның соңынан қарқынды салқындаудың басына дейінгі уақыт) және қарқынды салқындату ұзақтығында дайын илемде мүмкін болатын беріктік (σ_s) және икемділік (δ_s) деңгейлерін болжауға мүмкіндік береді. Бұл теңдеулер деформацияланған термиялық қатайтылған арматуралық профильдерді өндірудің өнеркәсіптік технологиясын жасау және енгізу кезінде соңғы механикалық қасиеттерді болжаудың бастапқы шарты болады.

Кілт сөздер: көміртекті болат, деформация-термиялық өңдеу, арматуралық профиль, қатайту, бүріккіш, құрылымды қалыптастыру, регрессия теңдеуі.

Developing a Mathematical Model for Integrated Deformation-heat Treatment for Predicting Mechanical Properties of Rolled Reinforcing Profiles

^{1*}**DZHAksymbetova Makpal**, doctoral student, dzhaxymbetova_ma@enu.kz,

¹**KANAev Amangeldy**, Dr. Tech. Sci., Professor, aman-kanaev2012.@yandex.ru,

¹Kazakh Agrotechnical University n.a. S. Seifullina, Kazakhstan, 010011, Nur-Sultan, Zhenis ave., 62,

*corresponding author.

Abstract. The purpose of research developing a mathematical model for integrated deformation-heat treatment for predicting mechanical properties of rolled reinforcing profiles. Research methods – experimental production of samples, evaluation of mechanical properties, metallographic analysis, modeling. In the conditions of combining hot rolling with subsequent high-temperature heat treatment, special attention should be paid to the features of the grain structure formation in the process of parallel recrystallization phenomena. An analytical review of the literature data on the problem of combining hot deformation with heat treatment shows that the efficiency of deformation-heat treatment depends on the rolling temperature, the total degree and fractionality of the deformation, the degree of single deformations, the time interval from the end of hot rolling to the beginning of accelerated cooling, and the duration of intensive cooling, which determines the self-tempering temperature, the type of the initial billet (cast or rolled) and finally the chemical composition of the processed steel. The mechanical properties of long products made of carbon steel of ordinary quality (St 5) by means of combined deformation-heat treatment can be increased to the level of mechanical properties of hot-rolled low-alloy steel of 35GS type. The mechanical properties of structural alloyed and high-alloyed steels can be achieved by combined deformation-heat treatment of low-alloyed steels, saving expensive and scarce alloying elements. The equations of regression models for ultimate strength and relative elongation have been obtained. These equations make it possible to predict possible levels of strength (σ_s) and plasticity (δ_s) in finished rolled products after combined deformation-heat treatment at given levels of deformation temperature, post-deformation pause (holding time from the end of deformation to the beginning of intensive cooling) and duration of intense cooling. These equations can serve as the initial prerequisite for predicting the final mechanical properties in developing and implementing the industrial technology of producing deformation-thermally hardened reinforcing profiles.

Keywords: carbon steel, deformation-heat treatment, reinforcing profile, hardening, nozzle, structure formation, regression equation.

REFERENCES

1. Kanaev A.T. Povyshenie kachestva sortovogo prokata deformatsionno-termicheskoi obrabotkoi. – Pavlodar: Arman-TV, 2009. – 180 s.
2. Durnev V.D., Sapunov S.V., Fedyukin V.K. Ekspertiza i upravlenie kachestvom promyshlennykh materialov. – SPb: Piter. 2004. – 254 s.
3. Uzlov I.G. Razvitie teorii i tekhnologii termicheskogo i termomekhanicheskogo uprochneniya konstruktsionnykh stalei // Fundamentalnye i prikladnye problemy chernoi metallurgii: Sbornik nauchnykh trudov. – 2004. – № 8. – S. 250-260.
4. Safyan A.M. Novye innovatsionnye tekhnologii proizvodstva sortovogo prokata // Tam zhe. – 2006. – № 12. – S. 175-178.
5. Kanayev A.T., Barizhanova D.S. Deformative and thermic strengthening of moving corner profiles in the stream of rolling machine // Materialy IV Mezinarodni vedecko-prakticka conference PREDNI VEDECKE NOVINKY – 2008. Praha. – 2008. – R. 52-55.