

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СОВМЕЩЕННОЙ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТЕРЖНЕВОЙ АРМАТУРНОЙ СТАЛИ

А. Т. Канаев¹, А. В. Богомолов², А. А. Канаев³, Е. Н. Решоткина⁴

¹ Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина (г. Астана, Казахстан),

² Павлодарский государственный университет им. С. Торайтырова (г. Павлодар, Казахстан),

³ Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева (г. Астана, Казахстан),

⁴ АО «Арселор Миттал Темиртау» (г. Караганда, Казахстан)

На опытно-промышленной установке с прямо- и противоточной форсунками исследовали влияние технологических параметров совмещенной деформационно-термической обработки на механические свойства стержневой арматурной стали. Показано, что при прерванной закалке с последующим самоотпуском продолжительность интенсивного охлаждения определяет температуру отпуска закаленной стали и тем самым уровень конечных механических свойств упрочняемых профилей. Исследованием влияния давления воды в камере интенсивного охлаждения на однородность механических свойств сталей с содержанием 0,31; 0,32 и 0,35 % С и варьированием давления воды от 0,2 до 0,6 МПа установлено, что для обеспечения механических свойств арматурных стержней на уровне класса прочности АТ500 согласно ГОСТ 10884—2004 необходимо устанавливать давление воды в охлаждающей камере не ниже 0,3 МПа, а содержание углерода в стали — более 0,32 %.

Ключевые слова: арматурная сталь, установка, прерванная закалка, самоотпуск, упрочнение, класс прочности, механизм упрочнения, наклеп, аустенит, мартенсит.

Деформационно-термическое упрочнение (ДТУ) стержневой арматурной стали в технологических процессах обеспечивает существенное повышение комплекса механических и эксплуатационных свойств арматурных профилей из углеродистых и низколегированных сталей.

Такой технологический процесс обеспечивает значительную экономию материальных и энергетических ресурсов [1, 2]. При изготовлении железобетонных конструкций весь металл (вся арматура периодического профиля) расходуется необратимо, оставаясь в бетоне. Поэтому снижение металлоемкости железобетонных конструкций за счет повышения их прочностных характеристик является важной научно-технической задачей, решение которой демонстрирует эффективность метода ДТУ.

Экономия энергетических ресурсов заключается в использовании для ДТУ (закалки) остаточного тепла нагрева металла после горячей прокатки (термическая обработка совмещается с процессом горячей пластической деформации), в замене печного отпуска, требующего больших капитальных вложений, на самоотпуск, не влекущий дополнительных расходов электроэнергии (ввиду отсутствия отпускных печей).

При производстве упрочненных арматурных профилей широко применяется так называемая прерванная закалка с последующим самоотпуском. При использовании такого способа интенсивное охлаждение со сверхкритической скоростью осуществляется до достижения определенной толщины мартенситного слоя у поверхности, после чего ускоренное охлаждение арматурного профиля прерывают. При этом самопроизвольно выравниваются температуры упрочняемого арматурного профиля по его сечению.

По мере увеличения длительности интенсивного охлаждения толщина закаленного мартенситного слоя у поверхности увеличивается, а отогрев мартенсита после прерывания закалки происходит до более низких температур. Соответственно с этим понижается степень самоотпуска мартенсита и, как следствие, ухудшаются пластические свойства проката. Поэтому температура самоотпуска является важнейшим технологическим фактором, определяющим необходимый комплекс механических свойств арматурных профилей [3].

Материал и методы проведения исследований. Материалом для исследований выбраны арматурные профили диам. 20, 22 и 25 мм из углеродистой стали Ст5сп согласно ГОСТ 380—2004 с варьированием содержания углерода в пределах указанного стандарта. Исследования проводили на опытно-промышленной установке с прямо- и противоточной форсунками для совмещенной деформационно-термической обработки сортового проката из непрерывнолитой заготовки в технологическом потоке прокатки [4].

Принцип работы установки заключается в том, что охлаждающая вода под высоким давлением через кольцевую щель форсунки поступает в камеру охлаждения, а движущийся арматурный профиль, проходя через камеру охлаждения, взаимодействует с водой и подвергается ДТУ. Скорость охлаждения профиля при этом зависит от расхода воды и ее давления в камере охлаждения. Давление и расход воды в камере охлаждения зависят от соотношения размеров кольцевой щели форсунки и кольцевого сечения камеры охлаждения, изменяющегося в зависимости от диаметра упрочняемого профиля и внутреннего диаметра трубчатой камеры при постоянной ее длине.

Таблица 1. Влияние содержания углерода в стали, продолжительности τ интенсивного охлаждения и давления (0,2/0,4/0,6 МПа) воды в камере охлаждения на механические свойства стержневой арматуры диам. 20 мм из углеродистой стали Ст5сп

C, %	τ , с	σ_b , Н/мм ²	σ_T , Н/мм ²	δ_5 , %
0,28	1,5	520/560/620	410/440/490	28,0/23,0/21,0
	2,0	600/650/710	470/530/580	25,0/22,0/20,0
	3,0	650/710/780	510/580/640	22,0/20,0/19,09
0,32	1,5	560/600/650	440/500/540	26,5/21,5/19,0
	2,0	660/700/760	520/590/630	23,5/20,0/18,0
	3,0	710/780/830	570/660/700	21,5/19,0/17,0
0,35	1,5	610/660/690	450/530/570	24,0/21,0/18,5
	2,0	720/760/820	540/630/660	22,0/18,5/16,0
	3,0	790/860/890	610/710/750	21,0/15,0/13,0

Механические свойства образцов, подвергнутых ДТУ, определяли на установке «Инстрон», предварительно подготовив образцы по ГОСТ 1497–2004. Отдельные механические испытания дублировали методом неразрушающего контроля образцов от готовых профилей феррозондовым коэрцитиметром КИФМ-1, который основан на принципе устойчивых корреляционных связей между механическими и магнитными свойствами проката. Зависимость показаний феррозондового коэрцитиметра КИФМ-1 от температуры проката показала, что неразрушающий контроль горячекатаных профилей из стали Ст5сп возможен при температуре проката до 150 °С, а из низколегированной стали 35ГС — до 100 °С. Для микроструктурного анализа образцы изготавливали по стандартной методике, исключающей возможное нарушение исходной структуры.

Расход охлаждающей воды в диапазоне 40 – 100 м³/ч измеряли дифманометром ДМ-4. Давление охлаждающей воды в камере интенсивного охлаждения варьировали в пределах 0,2 – 0,6 МПа, использовали манометр ОВМ-1-160. Продолжительность интенсивного охлаждения между окончанием горячей прокатки и началом интенсивного охлаждения варьировали от 1,5 до 3,0 с. Температуру конца прокатки измеряли фотоэлектрическим пирометром ФЭП-4М. Для контроля температуры самоотпуска использован магнитометр, работающий по принципу измерения намагниченности насыщения ферромагнитных материалов.

Влияние содержания углерода на механические свойства упрочненных арматурных профилей. Для выяснения влияния углерода в стали (в пределах ГОСТ 380–2004) на механические свойства поверхностно-упрочненных арматурных профилей провели специальные эксперименты с содержаниями углерода 0,28, 0,32 и 0,35 %; продолжительность интенсивного охлаждения и давление воды в камере охлаждения поддерживали для каждого содержания углерода постоянными. Результаты этих экспериментов представлены в табл. 1. Из данных табл. 1 следует, что результаты ДТУ существенно зависят от содержания углерода в стали. Так, при изменении содержания углерода с 0,28 до 0,35 % в арматурном стержне диам. 20 мм из стали Ст5сп σ_b увеличивается с 650 до 760 Н/мм² при заданном давлении

и продолжительности интенсивного охлаждения 0,4 МПа и продолжительности интенсивного охлаждения 0,2 с, что соответствует увеличению содержания углерода в стали на 0,01 %. При этих же условиях, т. е. при изменении содержания углерода на 0,01 %, σ_T возрастает на 14 Н/мм², а δ_5 уменьшается на 0,8 %. Изменение давления воды в камере интенсивного охлаждения от 0,2 до 0,6 МПа при содержании углерода в стали 0,32 % вызывает увеличение σ_b от 660 до 760 Н/мм² при заданной продолжительности интенсивного охлаждения 2,0 с, что соответствует увеличению σ_b на 25 Н/мм² при повышении давления воды в камере охлаждения на 0,01 МПа. При этих же условиях, т. е. при изменении давления воды на 0,01 МПа, σ_T также возрастает на 25 Н/мм², а δ_5 уменьшается на 1,4 %.

Тенденция в изменении механических свойств ДТУ арматурных профилей диам. 25 мм такая же, как и в случае упрочнения арматурных профилей диам. 20 мм. Но при упрочнении стержней более крупного сечения механические свойства в зависимости от содержания углерода изменяются с меньшей интенсивностью. Так, изменение содержания углерода на 0,01 % в арматурных профилях диам. 25 мм вызывает увеличение σ_b на 10 – 12 Н/мм², σ_T на 5 – 10 Н/мм², уменьшение δ_5 на 0,4 %, а изменение давления охлаждающей воды в камере интенсивного охлаждения на 0,1 МПа вызывает изменение σ_b на 30 – 40 Н/мм², σ_T — на 20 – 25 Н/мм² и δ_5 — на 0,5 – 0,7 %.

Влияние продолжительности интенсивного охлаждения на результаты упрочнения. При прерванной закалке с последующим самоотпуском продолжительность интенсивного охлаждения определяет температуру отпуска закаленной стали и тем самым уровень конечных механических свойств упрочняемых профилей. Поэтому изменение продолжительности интенсивного охлаждения в камере ускоренного охлаждения установки приводит к существенному изменению механических свойств [4, 5]. Так, в арматурных профилях диам. 20 мм изменение продолжительности интенсивного охлаждения от 1,5 до 3,0 с приводит к росту σ_b с 520 до 650 Н/мм² при заданном давлении охлаждающей воды в камере охлаждения 0,2 МПа и содержании в углеродистой стали 0,28 % С. При этих же условиях, т. е. изменении продолжительности интенсивного

Таблица 2. Влияние продолжительности интенсивного охлаждения τ в сталях с 0,31 и 0,35 % С и давления 0,4/0,6 МПа воды в камере охлаждения на механические свойства стержневой арматуры диам. 25 мм из стали Ст5сп

С, %	τ , с	σ_b , Н/мм ²	σ_t , Н/мм ²	δ_5 , %
0,31	2,0	620/700	500/550	21,0/19,5
	3,0	680/750	550/590	19,5/18,5
0,35	2,0	670/750	540/580	19,5/18,0
	3,0	720/780	570/600	17,0/16,0

Таблица 3. Результаты (средн./макс./мин.) ДТУ стержневой арматурной стали Ст5сп. Температура конца прокатки 990 °С, С = 0,31 %, продолжительности интенсивного охлаждения 1,8 с, диаметр арматуры 20 мм

Давление воды, МПа	σ_b , Н/мм ²	σ_t , Н/мм ²	δ_5 , %
0,2	640/660/620	425/455/410	25,0/29,0/22,0
0,3	645/655/630	460/465/445	23,9/25,0/22,5
0,4	655/660/645	465/470/445	23,5/25,0/22,5

охлаждения с 1,5 до 3,0 с, σ_t арматурных профилей возрастает с 410 до 515 Н/мм², а δ_5 уменьшается с 21 до 19 %. Механические свойства арматурных стержней диам. 25 мм также зависят от продолжительности интенсивного охлаждения при упрочнении. При давлении охлаждающей воды в камере интенсивного охлаждения 0,4 МПа и содержании углерода 0,31 % (Ст5сп) изменение продолжительности интенсивного охлаждения от 2,0 до 3,0 с увеличивает σ_b с 620 до 680 Н/мм², σ_t — с 500 до 550 Н/мм², а δ_5 уменьшается с 19,5 до 18,5 %. Эти результаты, а также влияние продолжительности интенсивного охлаждения в стали с 0,35 % С при заданном давлении охлаждающей воды в камере интенсивного охлаждения представлены в табл. 2.

При ДТУ методом прерванной закалки с последующим самоотпуском в спокойной воде температура поверхности изделия, например, арматурного стержня диам. 16 мм быстро снижается до 100 °С и остается практически постоянной по окончании интенсивного охлаждения. Через 3 – 4 с после прерванной закалки температура по сечению такого проката выравнивается с установлением среднемассовой температуры, которую можно назвать температурой самоотпуска. При закалке поверхность изделия очень быстро приобретает температуру кипения воды, поэтому весь процесс охлаждения идет при постоянной температуре поверхности.

Для контроля температуры самоотпуска можно использовать магнитометры, работающие по принципу измерения намагниченности насыщения ферромагнитных материалов. Если в процессе ДТУ по тем или иным причинам температура самоотпуска отклоняется от заданной, ее восстанавливают, изменяя расход и давление подаваемой в охлаждающие секции воды. Контроль температуры самоотпуска с помощью магнитометров и возможность воздействия на нее в нужном направлении позволяют улучшить качество выпускаемой продукции.

Влияние колебания скорости прокатки в пределах 6,0 – 10 м/с, температуры конца прокатки — в пределах 980 – 1020 °С и содержания углерода — в пределах 0,32 – 0,37 % на изменение механических свойств в

готовом деформационно-термически упрочненном прокате корректируют регулированием давления охлаждающей воды в камерах по показанию манометра.

Влияние давления воды в камере интенсивного охлаждения на однородность механических свойств исследовали на сталях с разным содержанием углерода (0,31; 0,32; 0,35%), давление воды варьировали от 0,2 до 0,6 МПа. Для стали с 0,31 % С влияние давления воды на однородность механических свойств представлено в табл. 3. Из этих данных видно, что при давлении воды в охлаждающей камере 0,2 МПа среднее значение σ_b стержней из выборки $n = 8$ составило 425 Н/мм², что на 15 Н/мм ниже, чем предусмотрено ГОСТ 10884–2004 для арматурных стержней класса прочности Ат500 (А_т111). При давлении воды 0,3 МПа и выше все показатели механических свойств (σ_b , σ_t , δ_5) соответствуют требованиям, предъявляемым указанным стандартом к арматурным стержням класса прочности Ат500. При этом разброс показателей механических свойств незначителен и также соответствует требованиям. Таким образом, для обеспечения механических свойств арматурных стержней на уровне класса прочности Ат500 согласно ГОСТ 10884–2004 необходимо давление воды в охлаждающей камере устанавливать не ниже 0,3 МПа, а содержание углерода в стали желательно более 0,32 %.

Изменение давления охлаждающей воды в камере интенсивного охлаждения от 0,3 до 0,5 МПа при содержании в стали 0,32 % С вызывает увеличение σ_b арматурных профилей диам. 25 мм с 670 до 700 Н/мм² при заданной продолжительности интенсивного охлаждения 2,0 с. Это соответствует увеличению σ_b на 15 Н/мм² при увеличении давления охлаждающей воды на 0,1 МПа. При этих же условиях, т. е. при изменении давления воды на 0,1 МПа, величина σ_t возрастает всего на 5 Н/мм², а δ_5 снижается на 2,0 %. Исследование механических свойств по длине (на уровне 10, 30 и 55 м) упрочненных арматурных профилей показывает, что как прочностные, так и пластические характеристики распределены более или менее равномерно и находятся в пределах выше минимальных уровней соответствующих показателей, оговоренных в ГОСТ

Таблица 4. Результаты (средн./макс./мин.) ДТУ стержневой арматурной стали Ст5сп. $t_{к.п} = 1010$ °С, $C = 0,32$ %, $\tau = 2,0$ с, диаметр арматуры 25 мм

Давление воды, МПа	σ_b , Н/мм ²	σ_t , Н/мм ²	δ_5 , %
0,3	670/700/620	445/510/440	21,0/26,5/16,8
0,5	700/730/670	450/540/470	18,5/21,5/14,8

10884–2004 для арматуры класса прочности Ат500. Особенно надежны резервы по σ_b и δ_5 даже при минимальных давлениях охлаждающей воды 0,3 МПа; σ_t находится при этом на предельном уровне требований ГОСТ 10884–2004.

Для обеспечения надежного попадания всех показателей механических свойств в пределы, оговоренные ГОСТ 10884–2004, с учетом возможных разбросов на нижнем пределе не ниже $\sigma_t = 440$ Н/мм² необходимо при заданной продолжительности интенсивного охлаждения 2 с установить давление воды 0,5 МПа и подвергать ДТУ арматурные стержни, прокатываемые из стали Ст5сп с $\geq 0,32$ % С.

Механизмы термоупрочнения и влияние содержания углерода на механические свойства стержневой арматурной стали. Из всех элементов, вводимых в сталь для достижения после ДТУ определенного комплекса физических, механических, технологических и других характеристик, углерод является главным, определяющим закаляемость, т. е. способность стали приобретать максимальную твердость при закалке. Однако повышение твердости и прочности мартенсита с ростом в стали содержания углерода достигается ценой снижения пластичности и особенно ударной вязкости. При образовании твердых растворов внедрения атомы углерода в феррите (α -Fe) и аустените (γ -Fe) характеризуются неупорядоченным, статистически равновероятным расположением в октаэдрических междуузлиях по всем возможным кристаллографическим осям и плоскостям кристалла. Но в решетке мартенсита атомы углерода располагаются уже упорядоченно, в основном (на 80 %) только в октаэдрических междуузлиях с координатами $[0, 0, 1/2]$ и $[1/2, 1/2, 0]$, т. е. в междуузлиях вдоль рядов атомов железа, параллельных тетрагональной оси $[001]$ и по плоскостям (001) , перпендикулярным оси тетрагональности. Такое расположение атомов углерода в мартенсите приводит к деформации решетки мартенсита — появлению тетрагональности. Поэтому с увеличением содержания углерода тетрагональность (отношение осей c/a) решетки мартенсита практически линейно возрастает [9].

Именно этим объясняется важнейшая роль углерода во всех теориях мартенситного превращения. Вследствие бездиффузионного характера мартенситного превращения кристаллы мартенсита представляют собой пересыщенный раствор углерода в α -Fe. С увеличением степени пересыщенности, т. е. с увеличением содержания углерода в мартенсите, напряжение течения в нем растет. Рентгенографические исследования показывают, что атомы углерода, внедренные в решетку α -Fe, вызывают в нем тетрагональные иска-

жения и приводят к неэквивалентности разных систем скольжения. Это затрудняет скольжение дислокаций в мартенсите, что составляет суть так называемого твердорастворного механизма упрочнения.

Другим механизмом упрочняющего влияния углерода является образование атмосфер Коттрелла на дислокациях и, следовательно, закрепление дислокационной структуры при закалке или последующем выдерживании при комнатной температуре несколько часов. Эффективность торможения движения дислокаций зависит от размера атмосферы Коттрелла, плотности атомов примеси в ней, температуры и других факторов.

Необходимо подчеркнуть, что мартенсит, в отличие от фазы того же химического состава, но образовавшийся при медленном охлаждении, характеризуется повышенной плотностью дефектов упаковки и дислокаций в кристаллической решетке. Плотность дислокаций в мартенсите достигает $10^{10} - 10^{12}$ см⁻², по порядку величины такую же, как и в холоднодеформированном металле. Границы двойников и сплетения дислокаций служат барьером для скользящих дислокаций, упрочняя мартенсит (это наиболее важная часть упрочнения).

Кроме указанных механизмов упрочнения, в любых сталях углерод при обычных скоростях закалки успевает образовывать сегрегации на дефектах решетки аустенита в период охлаждения выше точки M_n . Дефекты кристаллической решетки представляют собой энергетически более выгодные места для атомов углерода, чем нормальные позиции этих атомов в решетке мартенсита. Атомы углерода упруго притягиваются к дислокациям и дислокационным стенкам. Такие сегрегации углерода в аустените наследуются мартенситом в процессе превращения $\gamma \rightarrow \alpha$, а поскольку он и так пересыщен углеродом, то эти сегрегации становятся местами зарождения частиц карбидов. При очень больших скоростях охлаждения твердость кристаллов мартенсита оказывается почти в полтора раза выше, чем после обычной закалки [10].

Один из сильных механизмов упрочнения — «горячий» наклеп аустенита, который может реализоваться при интенсивном охлаждении горячедеформированной стали с температур выше A_{c3} по схеме прерванной закалки с последующим самоотпуском. По этой схеме, впервые использованной К. Ф. Стародубовым [11] для термического упрочнения массовых видов прокатной продукции из малоуглеродистых сталей, прокат интенсивно охлаждается водой непосредственно на выходе из последней чистовой клетки прокатного стана; по достижении температуры M_n охлаждение прерывается и затем продолжается на воздухе. Дополнитель-

ное по сравнению с обычной закалкой упрочнение проката происходит благодаря тому, что в условиях интенсивного охлаждения сразу по выходе из прокатного стана затруднено развитие рекристаллизационных (разупрочняющих) процессов горяченаклепанного аустенита. Поэтому горячий наклеп, который при минимальной продолжительности паузы от конца горячей прокатки и до начала закалки передается от аустенита к мартенситу, естественно, упрочняет его.

Отметим еще один механизм упрочнения, который вносит в той или иной степени вклад в общее упрочнение стали. Фазовый наклеп, являющийся следствием существенного (на 2 – 3 %) увеличения удельного объема стали при аустенитно-мартенситном превращении, приводит к росту плотности дефектов кристаллической решетки и по механизму торможения скользящих дислокаций упрочняет мартенсит [12].

Таким образом, можно утверждать, что ДТУ при быстром охлаждении стали на мартенсит является результатом действия нескольких механизмов торможения дислокаций. Однако вклад каждого из этих механизмов в общее упрочнение стали при закалке (особенно для малоуглеродистых сталей) окончательно не установлен.

ВЫВОДЫ

1. При ДТУ движущегося проката комплексным параметром, отражающим изменчивость технологических параметров и определяющим физико-механические свойства данной стали, является температура самоотпуска. Поэтому именно этот параметр целесообразно контролировать и регулировать при ДТУ движущегося проката для получения заданного сочетания физико-механических свойств.

2. Для получения механических свойств деформационно-термически упрочненной арматурной стали Ст5сп, соответствующих классу прочности Ат500 согласно ГОСТ 10884–2004, необходимо подвергать упрочнению стержни диам. 20 мм при давлении охлаждающей воды в камере интенсивного охлаждения не ниже 0,25 МПа, а стержни диам. 25 мм — не ниже 0,35 МПа при содержании $\geq 0,32\%$ С.

3. ДТУ при быстром охлаждении стали на мартенсит — результат действия нескольких механиз-

мов торможения дислокаций: образования атмосфер Коттрелла на дислокациях и сегрегации на дефектах решетки аустенита, передачи горячего наклепа на фазовый наклеп при аустенитно-мартенситном превращении в процессе совмещенной деформационно-термической обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лякишев Н. П., Щербединский Г. В. Повышение прочности малоуглеродистой стали массового назначения // Изв. АН СССР. Металлы. 1990. № 1. С. 5 – 13.
2. Канаев А. Т., Рамазанова Ж. М. Модернизация структуры поверхностного слоя металлических материалов. — Астана : ТОО «Мастер-ПО», 2014. — 208 с.
3. Канаев А. Т., Bogomolov A. B. Assessment of efficiency of mechanisms of hardening ferritic-pearlitic steels // Cambridge Journal of Education and Science. 2015. № 2. P. 642.
4. Гольдштейн М. И., Емельянов А. А., Пышминцев И. Ю. Упрочнение малоуглеродистых сталей // Сталь. 1996. № 66. С. 53 – 58.
5. Баранов А. А., Геллер А. Л., Горбатенко В. П. Проблемы совмещения горячей деформации и термической обработки стали. — М. : Металлургия, 1995. — 128 с.
6. Канаев А. Т. Совмещенная деформационно-термическая обработка сортового проката. — Астана : ТОО «Мастер-ПО», 2017. — 170 с.
7. Вивенцов А. С., Каскин Б. К., Вдовин С. В. и др. Освоение производства продукции на новом сортопрокатном стане // Сталь. 2010. № 6. С. 63 – 64.
8. Узлов И. Г., Раздобреев В. Г., Федорова И. П. и др. Особенности формирования структуры и свойств сортового проката из малоуглеродистых и низколегированных сталей при низкотемпературных деформационно-термических обработках // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2004. № 3. С. 63 – 68.
9. Курдюмов Г. В., Утевский Л. М., Энтин Р. И. Превращение в железе и стали. — М. : Наука, 1987. — 237 с.
10. Канаев А. Т., Джаксымбекова М. А., Канаев А. А., Богомолов А. В. Анализ механизмов дислокационного упрочнения стали и сплавов // Вестник ЕНУ им. Л. Н. Гумилева. 2015. № 2. С. 211 – 218.
11. Стародубов К. Ф. Упрочнение прокатных изделий путем термической обработки / Сб. науч. трудов «Термическая и термомеханическая обработка стали». — М. : Металлургия, 1984. С. 5 – 8.
12. Тушинский Л. И. Структурная теория конструктивной прочности материалов. — Новосибирск : изд-во НГТУ, 2005. — 400 с.