

ГОСТЬ НОМЕРА

УДК 669.017.3:669.14:621.771.07

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ, СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЮ И УПРОЧНЕНИЮ ЛЕГИРОВАННЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ



Крылова Светлана Евгеньевна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры материаловедения и технологии материалов, Оренбургский государственный университет, Оренбург
e-mail: krilova27@yandex.ru

***Аннотация.** Изложены научные основы разработки рациональных составов и способов упрочнения крупногабаритного металлургического инструмента из микролегированных сталей. На основании обобщения экспериментальных данных выявлены закономерности фазовых и структурных превращений на различных этапах технологического цикла; исследованы и описаны взаимосвязи между параметрами структуры, химическим составом и механическими свойствами. Разработаны режимы термической обработки, обеспечивающие необходимую прочность, твердость и ударную вязкость для надежной работы крупногабаритного тяжело нагруженного инструмента.*

***Ключевые слова:** металлургический инструмент, микролегирование, карбидное упрочнение, дисперсионное твердение, пластическая деформация, моделирование температурно-напряженного состояния.*

***Для цитирования:** Крылова С. Е. Концептуальный подход к разработке, структурообразованию и упрочнению легированных инструментальных сталей // Шаг в науку. – 2023. – № 1. – С. 4–10.*

CONCEPTUAL APPROACH TO THE DEVELOPMENT, STRUCTURE FORMATION AND HARDENING OF ALLOYED TOOL STEELS

Krylova Svetlana Evgenievna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Materials Science and Technology of Materials, Orenburg State University, Orenburg
e-mail: krilova27@yandex.ru

***Abstract.** The scientific foundations for the development of rational compositions and methods for hardening large-sized metallurgical tools made of microalloyed steels are presented. Based on the generalization of experimental data, the regularities of phase and structural transformations at various stages of the technological cycle were revealed; relationships between structural parameters, chemical composition, and mechanical properties have been investigated and described. Heat treatment modes have been developed that provide the necessary strength, hardness and impact strength for reliable operation of large-sized heavy-duty tools.*

***Key words:** metallurgical tools, microalloying, carbide hardening, dispersion hardening, plastic deformation, modeling of temperature-stress state.*

***Cite as:** Krylova, S. E. (2023) [Conceptual approach to the development, structure formation and hardening of alloyed tool steels]. *Shag v nauku* [Step into Science]. Vol. 1, pp. 4–10.*

Рост производства и потребления металлопродукции в нашей стране и мире вызвал интенсивное развитие теоретического и прикладного материаловедения с середины XX годов. Однако последовавшие

в конце прошлого века политические процессы резко затормозили развитие отечественной металлургии и тяжелого машиностроения, произошла переориентация многих предприятий на использование

зарубежного оборудования, материалов и технологий [5]. В условиях нынешней внешнеполитической обстановки, многие отечественные предприятия испытывают серьезные научно-технические проблемы, обуславливающие необходимость восстановления и развития отечественной базы металлургической и металлообрабатывающей промышленности, в области производства конкурентоспособного рабочего инструмента металлургического оборудования. Учитывая мировые тенденции, актуальность разработки экономнолегированных сталей, а также совершенствования технологии упрочнения металлургического инструмента очевидна.

Традиционно основным материалом для изготовления крупногабаритного инструмента (прокатных валков, бронеплит, штампов горячего деформирования), работающего в условиях высоких температур, повышенного нагружения и износа, являются стали типа 50ХН, 60ХН, 75ХМФ, 90ХФ и др., отличающиеся достаточной технологичностью, но низкой эксплуатационной стойкостью готового инструмента. Более перспективными в последнее время являются высокохромистые инструментальные стали мартенситного класса (45Х5МФ, 75Х5МФ, 90Х5МФ), относящиеся к дисперсионно-твердеющим с карбидным упрочнением, легированным сильными карбидообразующими элементами. Промышленный опыт их эксплуатации на машиностроительных и металлургических предприятиях Восточного Оренбуржья показал ряд проблем, связанных с низкой технологичностью на основных переделах, наличием протяженной карбидной сетки из-за повышенного содержания легирующих элементов (хрома), а также

эксплуатационных дефектов в виде трещин разгара, сколов на поверхности, низкой эксплуатационной стойкости и износостойкости [3].

Формирование комплексного подхода к разработке новых марок инструментальных сталей на сегодняшний день представляет одну из актуальных научных и производственных задач, что повлекло за собой необходимость проведения поисковых работ в области оптимизации легирующего комплекса и режимов термической обработки, позволяющих получить требуемое сочетание механических и эксплуатационных свойств.

Проблему разработки и оптимизации химического состава микролегированных сталей для металлургического инструмента решали комплексно с применением методов математической статистики, в том числе с применением пакета современных программ «КОМПЛЕКС», разработанного Уральским НИИ черных металлов (г. Екатеринбург), а также с использованием программ математической и графической обработки экспериментальных данных. В качестве критериев при выборе химического состава экспериментальной стали были приняты максимальные значения износостойкости КАС, твердости HRC и ударной вязкости KCU. В результате многофакторного эксперимента и регрессионного статистического анализа были разработаны и рекомендованы к дальнейшему исследованию и промышленной апробации три опытные марки сталей (70ХЗГ2ВТБ, 70ХЗГ2ФТР, 100ХЗГ2МТР) инструментального класса с различным микролегирующим комплексом [2]. Химический состав заготовок диаметром 330 мм и высотой 500 мм представлен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав разработанных сталей, % (масс.)

Марка стали	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Nb	W	B	Al	Mo	V	Ti
100ХЗГ2МТР	0,90	1,94	0,65	0,021	0,011	2,87	0,07	0,06	-	-	0,003	0,041	0,48	-	0,43
70ХЗГ2ФТР	0,67	1,92	0,59	0,022	0,010	2,92	0,09	0,08	-	-	0,0015	0,032	-	0,62	0,39
70ХЗГ2ВТБ	0,64	1,90	0,61	0,023	0,012	2,85	0,10	0,12	0,055	0,35	-	0,048	-	-	0,46

Источник: разработано автором

Литая структура предложенных сталей характеризуется выраженным дендритным строением, дендриты имеют значительную разветвленность, средний диаметр ветвей около 0,15–0,18 мкм, в свободном виде присутствуют включения карбидного типа, о чем свидетельствуют результаты электронной сканирующей микроскопии, рисунок 1. Литая структура соответствует твердости 35–45 HRC. Для

уменьшения последствий неоднородного затвердевания литые заготовки подвергали сфероидизирующему отжигу в интервале температур 850–1050 °С. Структура экономнолегированных сталей на этапе сфероидизации представляет собой смесь пластинчатого и зернистого перлита, наблюдаются отдельные области с фрагментированной карбидной сеткой, соответствующей 3–4 баллам.

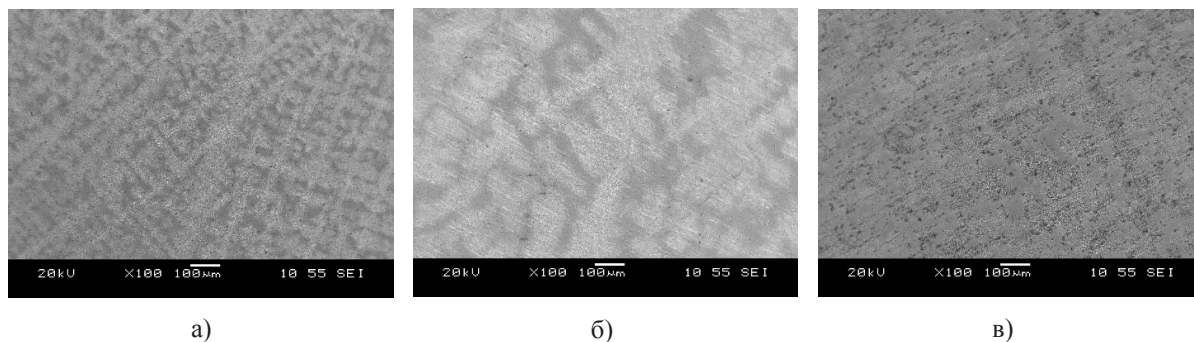


Рисунок 1. Микроструктура экспериментальных сталей в литом состоянии: а) – 100X3Г2МТР; б) – 70X3Г2ФТР; в) – 70X3Г2ВГБ

Источник: разработано автором

Исследование тонкой структуры сталей 70X3Г2ВГБ, 70X3Г2ФТР и 100X3Г2МТР после отжига показало, что в процессе нагрева с последующим комбинированным охлаждением произошло дополнительное обеднение матрицы по углероду

за счет коагуляции имеющихся и выделения новых карбидов [1]. Средний размер выделений составляет около 0,1 мкм при минимальном расстоянии между частицами 0,3–0,5 мкм, рисунок 2.

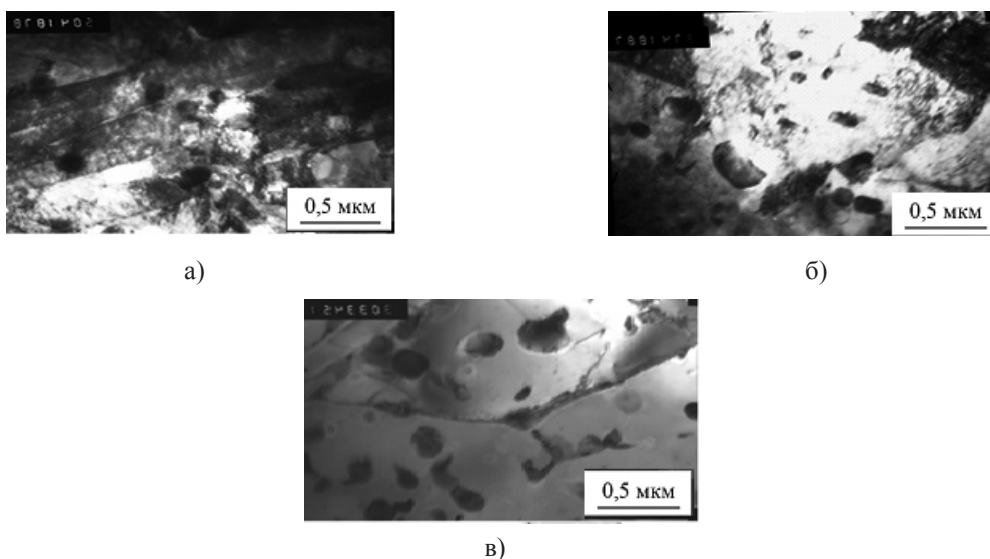
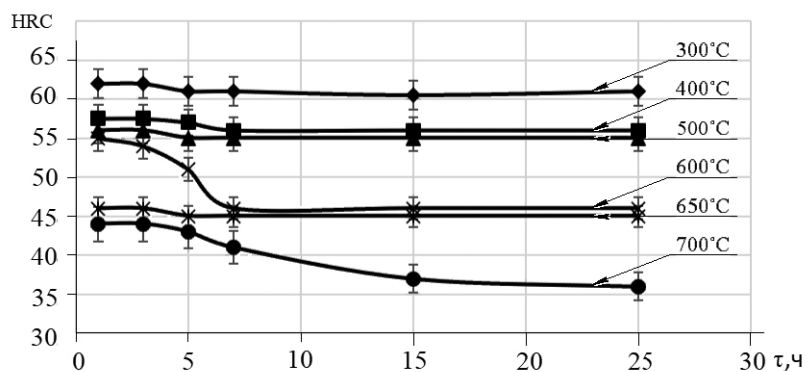


Рисунок 2. Тонкая структура исследуемых сталей после сфероидизирующего отжига: а) – 100X3Г2МТР; б) – 70X3Г2ФТР; в) – 70X3Г2ВГБ

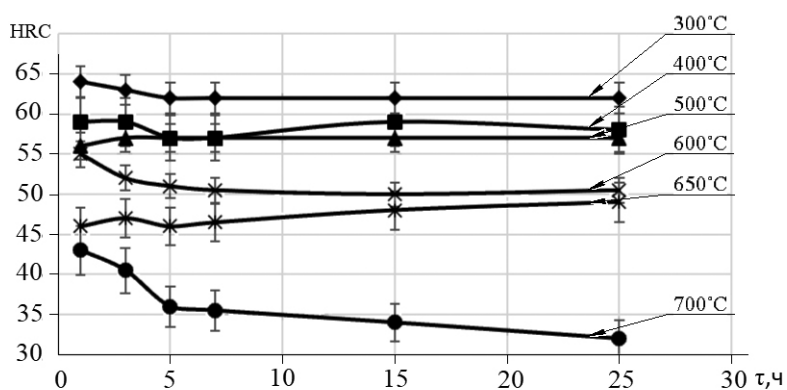
Источник: разработано автором на основе [1]

Для определения рациональных параметров упрочняющей термической обработки в работе изучена кинетика фазовых превращений при нагреве и охлаждении в широком интервале температур. Выполненное исследование позволило рекомендовать режимы закалки, включающие ступенчатый нагрев до температур 900–1000 °С, аустенитизацию с последующим охлаждением в масле. Подобный режим обеспечивает образование структуры тонкопластинчатого мартенсита с твердостью в пределах 53–55 HRC для 70X3Г2ВГБ и 70X3Г2ФТР, и 62–64 HRC для стали 100X3Г2МТР, сквозную прокаливаемость с содержанием количества мар-

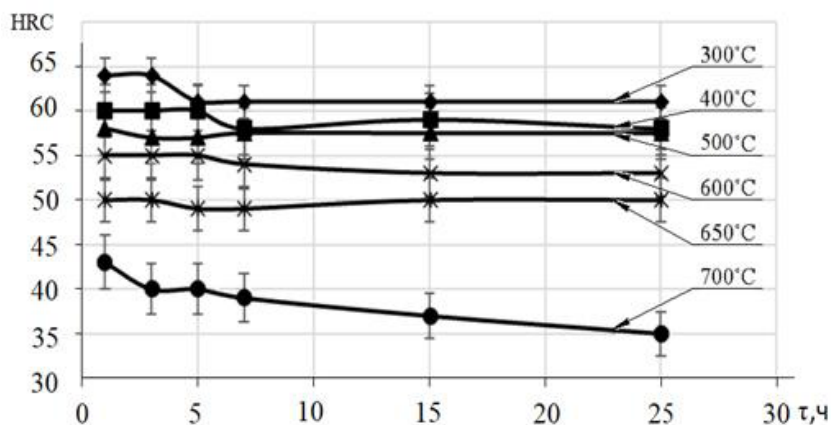
тенсита не менее 80% на расстоянии 70–80 мм от поверхности [1]. Для исследования процесса разупрочнения при отпуске были построены и проанализированы зависимости твердости от температуры и продолжительности выдержки, рисунок 3. Во всех исследованных сталях наблюдается замедление разупрочнения при отпуске, начиная с температуры 300 °С [8], с полной стабилизацией твердости в интервале температур 500–650 °С, причем с увеличением времени выдержки в данных температурных интервалах темп разупрочнения снижается, что обеспечивает стабилизацию твердости на уровне 50–55 HRC.



а)



б)



в)

Рисунок 3. Зависимость изменения твердости от температурно-временных параметров отпуска: а) – 100X3Г2МТР; б) – 70X3Г2ФТР; в) – 70X3Г2ВТБ

Источник: разработано автором

Эффект дисперсионного твердения также подтвержден металлографически методами [6]. В процессе отпуска во всех исследуемых сталях выделяются мелкодисперсные карбиды, заметные в структуре при увеличении в 5000 раз. Обра-

зованные включения равномерно распределены в металлической матрице сталей. Состав образующихся при отпуске карбидных частиц указан в таблице 2.

Таблица 2. Количество, тип и состав образующихся карбидов после различных режимов отпуска

Сталь	Температура отпуска, °С	Суммарное количество карбидов, %	Тип карбидов	Концентрация легирующих элементов в карбидах, % (масс.)							
				Mn	Fe	Cr	W	Ti	Nb	Mo	V
70ХЗГ2ВТБ	650	5,5–5,7	Me ₃ C Me ₇ C ₃ +Me ₂₃ C ₆ MeC	–	–	–	–	–	–	–	–
				2	71	25	1	1	–	–	
				–	6	10	29	40	15	–	
70ХЗГ2ФТР	600	5,5–5,6	Me ₃ C Me ₇ C ₃ +Me ₂₃ C ₆ MeC	–	–	–	–	–	–	–	–
				–	43	55	–	1	–	–	1
				–	13	14	–	49	–	–	16
100ХЗГ2МТР	550	5,3–5,6	Me ₃ C Me ₇ C ₃ +Me ₂₃ C ₆ MeC	–	81	19	–	–	–	–	–
				–	37	23	–	31	–	9	–
				–	1	7	–	70	–	22	–

Источник: разработано автором на основе [6]

Результаты проведенных исследований позволили выбрать рациональные параметры режимов окончательной термической обработки разработанных сталей в виде высокотемпературного отпуска в интервалах 600–650 °С для стали 70ХЗГ2ВТБ, 600 °С для стали 70ХЗГ2ФТР, 550 °С для стали 100ХЗГ2МТР [9].

Механические и технологические свойства (твердость, микротвердость, износостойкость, теплостойкость) определяли по стандартным методикам. Ударные испытания проводились на инструментированном маятниковом копре «Tinius Olsen» IT542 М с разложением ра-

бот на зарождение и распространение трещины. Экспериментально получены значения ударной вязкости термообработанных сталей инструментального класса при комнатной и повышенных температурах (350–500 °С), близких к температуре эксплуатации готовых изделий [7]. Динамика изменения ударной вязкости коррелирует со значениями трещиностойкости разработанных сталей (таблица 3), полученными в результате выполнения фазового рентгеноструктурного анализа и обработки дифрактограмм, используя отношение, связывающее размер пластической зоны с критическим значением коэффициента интенсивности напряжения:

$$h_{\max} = \frac{1}{n \cdot \pi} \left(\frac{K_{1c}}{\sigma_{0,2}} \right)^2,$$

где

h_{\max} – максимальная глубина пластической зоны, м;

$\sigma_{0,2}$ – предел текучести материала, МПа;

K_{1c} – коэффициент интенсивности напряжения, МПа $\sqrt{м}$;

n – коэффициент, отражающий локальное напряжение состояния материала в момент разрушения, МПа.

Таблица 3. Сравнительный анализ ударной вязкости и трещиностойкости разработанных сталей

Сталь	Параметры отпуска: (температура 600 °С; время выдержки, ч)		КСУ, кДж/м ² при температуре 20 °С	КСУ, кДж/м ² при температуре 500 °С	Трещиностойкость, МПа·м ^{1/2}
	3	5	7	7	
70ХЗГ2ФТР	3		27	156	54,5
	5		31	168	
	7		35	183	
70ХЗГ2ВТБ	3		127	250	56,5
	5		158	270	
	7		161	400	
100ХЗГ2МТР	3		56	201	53,5
	5		82	251	
	7		102	380	

Источник: разработано автором

Для проведения сравнительных стойкостных испытаний в производственных условиях ОАО «Орский машиностроительный завод» из стали 70X3Г2ФТР были изготовлены штампы для горячего деформирования в количестве 10 штук. Для сравнения также испытывали аналогичные штампы из сталей 5ХНМ и 4Х5МФС [4]. В результате легирования небольшими количествами относительно недорогостоящих элементов срок службы увеличился на 452 часа. Суммарное увеличение цены одного штампа из экспериментальной стали марки 70X3Г2ФТР, не уменьшает экономического эффекта, который достигается за счет увеличения срока службы на 10–15%.

Выводы

1. Изложен научно-обоснованный методологический подход к совершенствованию процессов структурообразования металлургических инструментальных сталей оптимизацией легирующего комплекса и режимов упрочнения, внедрение которого вносит значительный вклад в развитие металлургической отрасли России в части создания новых металлических материалов с заданным уровнем механических, технологических и экс-

плуатационных свойств.

плуатационных свойств.

2. Разработаны новые марки легированных сталей инструментального класса 70X3Г2ВТБ, 70X3Г2ФТР и 100X3Г2МТР с микролегирующим комплексом Mo-Ti-B, V-Ti-B, W-Ti-Nb, работающие в сложных условиях нагружения и интенсивного изнашивания. Показано, что стали с пониженным содержанием хрома удовлетворяют условиям производства и эксплуатации крупногабаритного инструмента.

3. Методом выделения карбидных осадков проведен анализ состава и количества карбидных фаз на различных этапах термической обработки. Подобраны оптимальные соотношения карбидообразующих элементов и углерода в металле, обеспечивающие формирование требуемого типа карбидов при сохранении прочной, вязкой металлической основы сплава.

4. Установлено, что при высокотемпературном отпуске в интервале 550–650 °С в сталях 100X3Г2МТР, 70X3Г2ВТБ и 70X3Г2ФТР происходит замедление разупрочнения (до 24 часов), связанное с явлением дисперсионного твердения за счет выделения мелкодисперсных частиц карбидов на основе Cr, Mo, Ti, V, W размером 0,01–0,06

Литература

1. Влияние кинетики распада переохлажденного аустенита на формирование структуры экономно-легированной инструментальной стали / С. Е. Крылова [и др.] // Физика металлов и металловедение. – 2013. – Т. 114, № 10. – С. 926, <https://doi.org/10.7868/S0015323013100069>.

2. Крылова С. Е., Ромашков Е. В. Особенности термической обработки новой стали для изготовления штампов горячей деформации // Черные металлы. – 2021. – № 1. – С. 54–60, <https://doi.org/10.17580/чм.2021.01.08>.

3. Патент № 2535148 С2 Российская Федерация, МПК С22С 38/38. Инструментальная сталь для горячего деформирования: № 2013100389/02; заявл. 09.01.2013; опубл. 10.12.2014 / С. В. Каманцев, С. О. Соколов, С. Е. Крылова [и др.]; заявитель Открытое акционерное общество «Машиностроительный концерн ОРМЕТО-ЮУМЗ». – 5 с.

4. Ромашков Е. В., Крылова С. Е. Повышение механических свойств и служебных характеристик комплексно легированных штамповых сталей // Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов: материалы XXIV Уральской школы металлословедов-термистов, Магнитогорск, 19–23 марта 2018 года / ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова». – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, 2018. – С. 118–120.

5. Снижение издержек производства на машиностроительном предприятии посредством внедрения инновационных технологий / Н. В. Спешилова [и др.] // Современные ТЕХНОЛОГИИ: АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ, ДОСТИЖЕНИЯ И ИННОВАЦИИ: сборник статей XXXIII Международной научно-практической конференции, Пенза, 20 декабря 2019 года. – Пенза: «Наука и Просвещение» (ИП Гуляев Г. Ю.), 2019. – С. 112–117.

6. Структурообразование экономно-легированных сталей для металлургических инструментов: монография / Крылова С. Е. [и др.]. – Оренбург: ОГУ, 2019. – 276 с.

7. Krylova S. E., Romashkov E. V., Gladkovsky S. V., Kamantsev I. S. (2019) Special aspects of thermal treatment of steel for hot forming dies production. *Materials Today: Proceedings*. Vol. 19, pp. 363–369, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.197>.

8. Krylova S. E., Romashkov E. V., Gladkovskiy S. V. (2020) Conceptual approach to development, structure formation and hardening micro-alloyed by steels for the metallurgical tool. *Solid State Phenomena*. Vol. 299, pp. 658–663, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.299.658>.

9. Romashkov E. V., Krylova S. E., Fot A. P., Romashkova O. A. (2019) The influence of heat treatment conditions on structuring of steel for production of injection molding. *Materials Today: Proceedings*. Vol. 11, pp. 363–369, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.12.159>.

Информация об авторе:

Светлана Евгеньевна Крылова, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры материаловедения и технологии материалов, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

ORCID ID: 0000-0002-5303-9780, **Scopus Author ID:** 43861360400, **Researcher Author ID:** D-9719-2015, **РИНЦ Author ID:** 357744, **CPI ID:** 109-172

e-mail: krilova27@yandex.ru.

Крылова С. Е. 23 года занимается научной и преподавательской деятельностью в образовательных организациях высшего образования Российской Федерации в системе традиционного и дистанционного обучения, автор более 130 научных и учебно-методических работ, в том числе в базе РИНЦ, Scopus и Web of Science.

Является членом диссертационного совета Д 24.2.352.01 по научной специальности 2.6.1 Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов на базе Оренбургского государственного университета.

Преподавательскую и научно-исследовательскую работу совмещает с производственной деятельностью в должности главного металлурга промышленного предприятия ООО «Технология» (Оренбург), аттестованный специалист III уровня Национального Агентства Контроля Сварки (НАКС) с правом преподавания и контроля технологий сварочного производства.

За внедрение результатов исследования в производство отмечена премией Губернатора Оренбургской области в сфере науки и техники за работу «Разработка составов и способов термической обработки инструментальных сталей с микролегирующим комплексом, предназначенных для тяжелоагрессивных изделий машиностроения» (2014, 2020 г.) и Почётными грамотами главы города Орска и Оренбурга за многолетнюю плодотворную работу и внедрение научных инноваций в промышленное производство г. Орска (2014 г.), г. Оренбурга (2018 г.).

Лауреат премии традиционного конкурса Лазерной ассоциации на лучшую отечественную разработку в области лазерных технологических комплексов и технологий для обработки промышленных материалов (Москва, 2017 г.)

Под её руководством подготовлены и защищены 3 кандидатские диссертации по специальности 05.16.01 Материаловедение и термическая обработка металлов и сплавов (г. Москва, ЦНИИЧЕРМЕТ им. Бардина, г. Оренбург, ОГУ).

С 2021 года Крылова С. Е. является рецензентом ежемесячного журнала ВАК «Черные металлы» и журнала «CIS Iron and Steel Review», выпускаемого два раза в год на английском языке. Эти журналы индексируются в Международной базе данных Scopus и входят во II и I квартиль соответственно.

Статья поступила в редакцию: 16.02.2023; принята в печать: 03.03.2023.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.