

ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА

**ҚАЗАҚСТАН ҒЫЛЫМЫ
МЕН ТЕХНИКАСЫ**

2001 ЖЫЛДАН БАСТАП ШЫҒАДЫ



**НАУКА И ТЕХНИКА
КАЗАХСТАНА**

ИЗДАЕТСЯ С 2001 ГОДА

ISSN 2788-8770

№ 3 (2025)

ПАВЛОДАР

**Omarov Zh. M., Zhakanov A. N., Yelmuratova A. F.,
Kaliyeva O. K., Dashzeveg D.**

Use of waste from metallurgical enterprises for the production
of dry construction mixtures

**Сариев О. Р., Алмагамбетов М. С., Нургали Н. З.,
Келаманов Б. С., Әбдірашит А. М.**

Отработка способов брикетирования пыли от дробления
высокоуглеродистого феррохрома

Туганбаева А. А., Аринова С. К., Квон Св. С., Исагулов А. З.

Термодинамическое моделирование фазовых превращений
в стали 40ХНЗМФ при различной модификации

КӨЛІК ТРАНСПОРТ TRANSPORT

**Мухаметжанова А. В., Жандарбекова А. М., Мурзабекова К. А.,
Қуанышбекова Қ. Қ., Искаков Д. С.**

Көлік саласының технологиялық трансформациясы:
жасанды интеллектінің мүмкіндіктері

**Rakishva A. A., Kokin S. B., Yessaulkov V. S.,
Petr Bouchner, Abishev K. K.**

On the problem of designing a vehicle with hybrid propulsion

**Сауханов Н. С., Имагамбетов М. Б., Ордабаева Г. М.,
Жаманбаев Б. У., Мырзабеков Н. М.**

Реттелетін қиылыста адаптивті басқару макеті

Тулепбек Н. Т., Оралбекова А. О., Ахметов Б. С.

Темір жол көлігіндегі маршал станцияларын басқаруды компьютерлендіру

Шукаманов Ж. Е., Сүлейменова Г. А., Павлов С.

Пойыздар қозғалысын интервалды реттеудің әртүрлі жүйелерінде
аралықтың өткізу қабілетін модельдеу

ҚҰРЫЛЫС СТРОИТЕЛЬСТВО CONSTRUCTION

Никитин В. А., Саканов К. Т., Макашев К. Т.

Трещиностойкость и деформативность балок
из тяжелого бетона и сталефибробетона

Свидерская Д. С., Мазина Ю. И., Лебедева М. С.

Архитектура как искусство создания общественных пространств
с точки зрения эстетики и функциональности

***А. А. Туганбаева¹, С. К. Аринова², Св. С. Квон³, А. З. Исагулов⁴**

^{1,2,3,4}Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Республика Казахстан, г. Караганда

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1248-8100>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1977-8157>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5439-4426>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2174-9072>

*e-mail: dicosia0789@gmail.com

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В СТАЛИ 40ХНЗМФ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ МОДИФИКАЦИИ

С использованием программного комплекса Thermo-Calc (версия 2025, база данных TCFe13) выполнено термодинамическое моделирование фазовых превращений в конструкционной легированной стали 40ХНЗМФ при различных вариантах модификации химического состава. Построены и проанализированы политермические разрезы для базового состава, стали с добавлением 1,5% Мо, а также стали с комплексной модификацией легирующими элементами Cr, Ni, Si и Al, введёнными по 0,4%. Установлено, что добавление молибдена повышает термическую стабильность карбидных фаз (в частности, $M_{23}C_6$ и MC), что способствует дисперсионному упрочнению и повышению износостойкости за счет подавления коалесценции карбидов при нагреве. Комплексные модификаторы, в свою очередь, способствуют стабилизации аустенитной фазы (особенно за счет Ni и Al), уменьшению образования грубых карбидов и интерметаллических соединений, а также повышению пластичности сплава благодаря гомогенизации структуры. Проведённый анализ фазовых превращений позволил точно определить температурные диапазоны полной аустенитизации и растворения основных карбидных фаз, что создаёт основу для оптимизации режимов термической обработки (включая температуру закалки и отпуска) с целью получения мелкозернистой, прочной и однородной структуры. Результаты моделирования могут быть использованы при проектировании составов сталей и технологий термической обработки для повышения их эксплуатационных свойств в ответственных узлах.

Ключевые слова: сталь, политермические разрезы, модификаторы, кристаллизация, фаза.

Введение

Высокопрочные легированные стали играют критическую роль в обеспечении надёжности и долговечности узлов и деталей, эксплуатируемых в условиях интенсивного абразивного износа, ударных нагрузок и агрессивных сред, особенно в горно-шахтной и тяжёлой машиностроительной отраслях [1; 2]. Сталь марки

40ХНЗМФ отличается высокой прочностью, прокаливаемостью и устойчивостью к усталостному разрушению, что делает её перспективной для изготовления валов, осей, шестерён и других ответственных компонентов [3, с. 58].

Ключевым фактором, определяющим эксплуатационные характеристики данной стали, является гомогенность её микроструктуры. Наличие крупнофазных включений, неоднородного распределения легирующих элементов и сегрегаций способно существенно ухудшать механические свойства и снижать износостойкость [4; 5].

Одним из наиболее эффективных путей улучшения микроструктуры и свойств является модифицирование. Введение молибдена (Mo) способствует повышению прокаливаемости, увеличивает сопротивление ползучести и обеспечивает стабилизацию структуры за счёт снижения температуры эвтектоидных превращений [6; 7]. Комплексные легирующие добавки, включающие алюминий (Al), кремний (Si), никель (Ni) и хром (Cr), оказывают синергетическое воздействие: они влияют на кристаллизационные процессы, способствуют рафинированию структуры и измельчению зерна, тем самым повышая износостойкость и стабильность свойств [8; 9].

Несмотря на наличие данных по влиянию отдельных элементов, комплексное воздействие многокомпонентных присадок в стали 40ХНЗМФ остаётся недостаточно исследованным. В этом контексте перспективным инструментом является термодинамическое моделирование на основе CALPHAD-подхода. Использование программного обеспечения Thermo-Calc позволяет прогнозировать фазовые равновесия, составы фаз, критические температуры и последовательность превращений без проведения дорогостоящих экспериментальных циклов [10; 11; 12].

Целью настоящей работы является моделирование фазовых превращений в стали 40ХНЗМФ, модифицированной двумя способами: введением 1,5 мас.% молибдена и многокомпонентной присадкой (Al, Si, Cr, Ni по 0,4 мас.%). Расчёты выполнены с использованием базы TCFE13 в Thermo-Calc с анализом фазовых диаграмм, температурных интервалов фазовых превращений и равновесных фазовых составляющих.

Материалы и методы

В рамках настоящей работы была проведена серия термодинамических расчётов с целью прогнозирования фазовых превращений в трёх вариантах стали 40ХНЗМФ при различных типах модифицирования. Для моделирования использовано программное обеспечение Thermo-Calc 2025a с базой данных TCFE13, предназначенной для описания фазовых равновесий в железоуглеродистых и низколегированных сталях [11; 12].

Thermo-Calc основан на CALPHAD-подходе (CALculation of PHase Diagrams), который позволяет вычислять фазовый состав, критические температуры, стабильность фаз и их количественные соотношения в условиях термодинамического равновесия. Этот метод широко применяется для оценки влияния легирующих элементов на структурную эволюцию сталей [13, с. 456].

Моделирование проводилось для трёх химических составов, представленных в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав исследованных сталей (мас. %)

Состав	C	Mn	Cr	Ni	Mo	Si	Al	V	Fe
40ХНЗМФ (базовый)	0.36	0.4	1.35	3.2	0.4	-	-	0.18	ост.
40ХНЗМФ (+Mo 1.5%)	0.36	0.4	1.35	3.2	1.9	-	-	0.18	ост.
40ХНЗМФ (+комплекс по 0.4%)	0.36	0.4	1.75	3.6	0.4	0.4	0.4	0.18	ост.

Для каждого состава были построены политермические разрезы фазовые диаграммы, отражающие стабильность фаз в зависимости от содержания ключевых элементов.

Расчёты проводились в температурном диапазоне от 400 до 1600 °С с шагом 100 °С. Предполагались условия термодинамического равновесия, атмосферное давление и отсутствие примесей (O, N, S), влияющих на фазовые превращения. Фазовые обозначения соответствуют принятой международной терминологии: FCC_A1 — γ -фаза (аустенит), BCC_A2 — α -железо, M₂₃C₆ — карбиды, SIGMA — σ -фаза и др. Термодинамическое моделирование позволяет выявить особенности влияния различных модифицирующих добавок на фазовые превращения и потенциальную склонность к образованию хрупких фаз.

Результаты и обсуждение

В данном разделе представлены результаты термодинамического моделирования фазового состояния стали 40ХНЗМФ при различных модификациях химического состава. Анализ проведён с использованием фазовых диаграмм, показывающих изменение состава фаз в зависимости от температуры. Для того чтобы приблизить результаты моделирования к реальной ситуации, в расчетах были использованы фактические значения химического состава стали. На основе полученных данных выполнены термодинамические расчёты, которые позволяют определить фазовый состав сплава при комнатной температуре, а также температуры фазовых превращений и ликвидуса.

На рисунке 1 показана объемная доля фаз, образующихся в рассматриваемой стали в диапазоне температур от 1000°С до комнатной температуры.

В нижнем интервале температур (500–550 °С) преобладает смесь твердых растворов типа BCC+FCC и сложные карбиды типа M₂₃C₆, M₇C₃. В диапазоне температур до 600 °С доминирующей фазой является BCC (объемная доля 96.5 %), а суммарная доля карбидов превышает 3% (M₂₃C₆ - 0.73 %, M₇C₃ - 2.42 %). В пределах 600°С-700 °С объемная доля твердых растворов типа BCC+FCC возрастает (обе фазы занимают ~49% по объему).

При этом наблюдается формирование дополнительной карбидной фазы MC_ETA, содержащей преимущественно Mo и V. Это указывает на увлечение карбидообразования. Наличие значительного количества сложных карбидов (M₇C₃, M₂₃C₆) в ферритной матрице повышает износостойкость и твердость стали [1; 7]. Карбиды типа MC (на основе ванадия и молибдена) благодаря высокой

термической стабильности повышает прочность и сопротивление разупрочнению при отпуске [6; 10]. Однако крупные или избыточные карбиды могут снижать пластичность и ударную вязкость, создавая точки концентрации напряжений [4; 5].

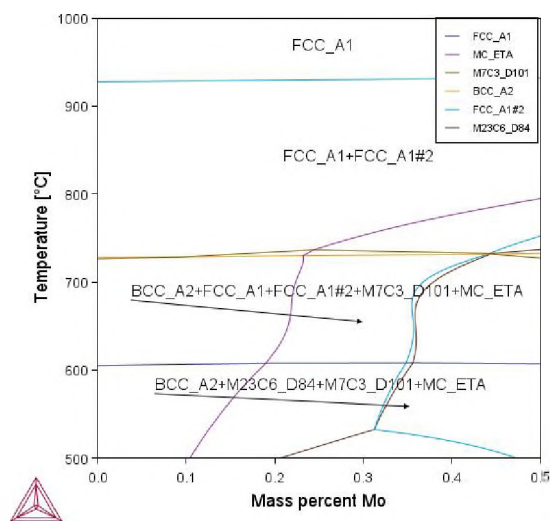


Рисунок 1 – Политермический разрез базового состава стали системы Fe-Ni-Cr

В диапазоне 730–920°C аустенит становится практически единственной стабильной фазой: доля FCC превышает 99 %, а все другие фазы вытесняются из системы. Это свидетельствует о благоприятных условиях для проведения аустенитизации при температурах выше 730 °C и возможности получения однородной структуры [3, с. 58].

Таким образом, даже в базовом составе без дополнительной модификации наблюдается переход от многофазной структуры к аустенитной при температурах выше 730 °C. Однако наличие устойчивых карбидов при пониженных температурах требует учёта при выборе режимов охлаждения, чтобы избежать избыточной карбидной фазы в готовом изделии, которая, несмотря на положительное влияние на износостойкость, может привести к снижению усталостной прочности и увеличению хрупкости [5].

На рисунке 2 в нижней температурной области наблюдается смесь твердого раствора типа ВСС и карбиды типа $M_{23}C_6$ и MC. Основной объём (~94 %) занимает твердый раствор типа ВСС, при этом суммарная доля карбидных фаз превышает 5 %, что указывает на значительное увеличение потенциала дисперсионного упрочнения по сравнению с базовым составом.

Это свидетельствует о значительной склонности к карбидообразованию при охлаждении. Молибден активно участвует в образовании карбидов M_6C и $M_{23}C_6$, а также упрочняет карбиды типа MC. Это приводит к существенному повышению твердости, сопротивления износу и сохранению прочности при повышенных температурах [1; 6; 7].

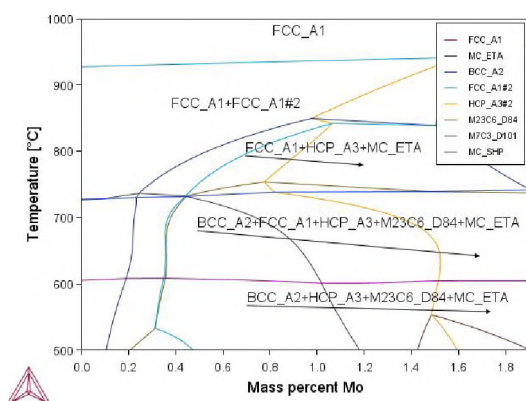


Рисунок 2 – Политермический разрез базового состава стали системы Fe-Ni-Cr с дополнительным содержанием молибдена

Вблизи температуры 700 °С фазовый состав значительно меняется: фиксируется совместное присутствие смеси твердых растворов типа BCC+FCC, а также остаточные карбиды. Аустенит стабилизируется преимущественно за счёт никеля и хрома, его доля достигает ~31 %, в то время как феррит занимает 64 % объёма. Присутствие фаз $M_{23}C_6$ и MC сохраняется, указывая на устойчивость карбидных фаз даже при повышенной температуре. Стабильность карбидов в двухфазной области подтверждает их роль в торможении роста аустенитного зерна при нагреве, что способствует получению более мелкозернистой и однородной конечной структуры после закалки, положительно влияя на прочность и ударную вязкость [8; 10].

При дальнейшем повышении температуры до 896 °С структура становится преимущественно аустенитной: FCC достигает ~99.8 % объёма. Остаточные карбиды практически исчезают. Это указывает на подходящий температурный интервал аустенитизации для проведения термообработки без риска вторичных фаз. Понижение температуры полной аустенитизации, по сравнению с базовым составом, является важным преимуществом, так как позволяет снизить энергозатраты на нагрев и уменьшить риск перегрева и роста зерна аустенита, негативно сказывающегося на вязкости [3; 6].

Свыше 980 °С сохраняется только аустенитная фаза, в которой равномерно распределены все легирующие элементы. Это подтверждает высокую растворимость легирующих компонентов в аустените при данной температуре, включая Mo, Cr, Ni, что важно для равномерного сплава при литье и закалке. Равномерное распределение Mo в аустените перед закалкой является предпосылкой для его эффективного участия в упрочнении мартенсита и подавлении процессов отпускной хрупкости на последующих стадиях обработки [6].

На рисунке 3 представлена объемная доля фаз, образующихся в рассматриваемой стали, модифицированной четырьмя элементами Cr, Ni, Si,

Al по 0.4 %. Комплексное легирование оказывает синергетическое влияние на фазовое равновесие, сдвигая температурные границы фаз и уменьшая объём нежелательных образований.

В области 600–650 °С преобладает смесь ферритной фазы с аустенитом и комплексами карбидов – $M_{23}C_6$, M_7C_3 , MC и остаточным графитом. При 609 °С твердый раствор типа ВСС составляет ~93.7 % объёма, а в твердый раствор типа FCC – около 3.6 %. В отличие от состава с 1.5 % Mo, здесь отмечается существенное уменьшение доли карбидов: графит – менее 0.6 %, M_7C_3 – 1.1 %, $M_{23}C_6$ – 0.4 % по сравнению с составом модифицированным 1.5 % Mo. Это говорит о более сбалансированном распределении углерода и снижении склонности к графитизации. Снижение объема крупных карбидов M_7C_3 и особенно подавление графитизации являются критически важными для улучшения пластичности и ударной вязкости стали [4; 5; 8]. Al и Si активно связывают углерод, способствуя формированию более мелких и стабильных карбидов или растворению углерода в матрице.

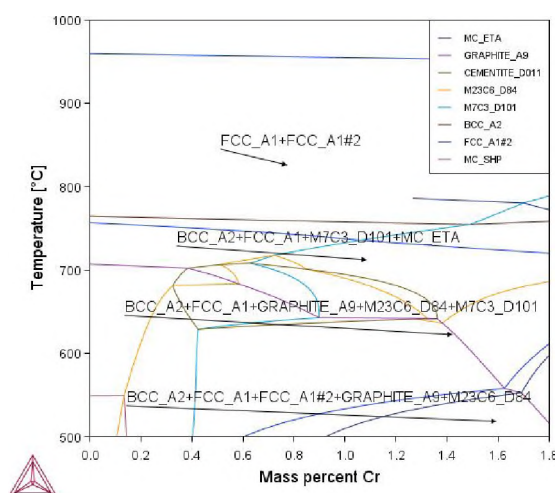


Рисунок 3 – Политермический разрез базового состава стали системы Fe-Ni-Cr с комплексной модификацией

При дальнейшем нагреве (650–710 °С) наблюдается появление цементита, однако его количество умеренное – около 3 % по массе. Аустенитная фаза увеличивается до 20 %, сохраняя стабильность даже при сравнительно низких температурах. Увеличение доли аустенита в двухфазной области и его стабильность при более низких температурах косвенно свидетельствуют об улучшении прокаливаемости стали [3; 8].

В высокотемпературной области (809 °С) фиксируется почти полная стабилизация аустенита — суммарная объёмная доля превышает 99.6 %, при этом легирующие элементы Ni, Cr, Al, Mo равномерно растворены в матрице. По сравнению с другими составами, это указывает на наиболее широкий интервал аустенитизации. Расширение области гомогенного аустенита обеспечивает

большую гибкость при выборе температур аустенитизации и гарантирует более полное растворение карбидов, что является основой для получения однородной, мелкозернистой структуры высокой прочности и вязкости после закалки [3; 8; 9].

Отдельного внимания заслуживает поведение фазы МС, содержащей V и Mo. Она сохраняется во всех вариантах, но в комплексе с остальными элементами её объёмная доля уменьшается, по сравнению с базовым составом, что может свидетельствовать об улучшении пластичности и уменьшении склонности к хрупкому разрушению. Хотя дисперсные карбиды МС полезны для упрочнения, их избыток может способствовать хрупкости.

Информация о финансировании

Данное исследование было проведено в рамках гранта Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (BR24993020)

Выводы

Проведенное термодинамическое моделирование фазовых превращений в стали 40ХНЗМФ при различных типах модифицирования добавлением 1.5% Mo и комплексной присадки Cr, Ni, Si, Al по 0.4% позволило установить следующее:

– При базовом составе выше температуры 730 °С в стали формируется однородная аустенитная структура за счёт вытеснения других фаз, что создаёт благоприятные условия для термической обработки. Однако при пониженных температурах сохраняются устойчивые карбиды, которые повышают твердость и износостойкость, но могут снижать пластичность и усталостную прочность за счет образования карбидной сетки.

– При дополнительном введении молибдена в количестве 1.5 % при температуре до ~700 °С преобладает ферритная фаза (ВСС) с карбидами $M_{23}C_6$ и МС, обеспечивающими дисперсионное упрочнение и повышенную износостойкость. При нагреве до 896 °С структура становится почти полностью аустенитной, что позволяет проводить аустенитизацию с меньшими энергозатратами и риском перегрева, сохраняя однородность и мелкозернистость структуры.

– При комплексной модификации стали Cr, Ni, Si и Al по 0,4 % снижается образование крупных карбидов и графита, улучшая пластичность и вязкость. При нагреве достигается широкий интервал аустенитизации и равномерное распределение легирующих элементов, что способствует формированию прочной и однородной структуры после закалки.

Термодинамическое моделирование показало, что модифицирование стали 40ХНЗМФ как за счёт добавления 1.5 % Mo, так и комплексной присадкой Cr, Ni, Si, Al по 0,4 % позволяет целенаправленно управлять фазовым составом и структурой в процессе термообработки. Это обеспечивает оптимальный баланс между твердостью, износостойкостью и пластичностью стали, расширяя технологические возможности для получения прочной и мелкозернистой структуры с высокой эксплуатационной надёжностью.

1 **Bai, Q., Wang, Y., Huang, X., Cui, J.** Effect of Cr and Mo addition on the microstructure and wear resistance of high-strength steel // *Materials Science and Engineering: A*. – 2021. – Vol. 804. – Article ID: 140662. – <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.140662>.

2 **Wang, D., Huang, M., Li, X., et al.** Microstructure evolution and wear behavior of medium-carbon bainitic steel // *Tribology International*. – 2019. – Vol. 138. – P. 111–120. – <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.05.007>.

3 **Каирбекова, А. Е., Баймухамедов, К. Ж.** Влияние термообработки на структуру и свойства стали 40ХНЗМФ // *Вестник Карагандинского университета*. Серия: Физика и математика. – 2020. – № 100(4). – С. 58–64.

4 **Zhang, K., Zhao, X., Liu, Y., et al.** Effect of rare earth elements on the microstructure and inclusion modification in high-strength steels // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2017. – Vol. 26(5). – P. 2295–2303. – <https://doi.org/10.1007/s11665-017-2650-7>.

5 **Pan, X., Luo, L., Wang, F., Zhang, J.** Refinement and strengthening mechanism in high-alloy steel modified by complex alloying // *Materials Characterization*. – 2020. – Vol. 159. – Article ID: 110020. – <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.110020>.

6 **Zhao, Y., Li, J., Wang, G., et al.** Influence of molybdenum on bainite transformation and mechanical properties in low-carbon steel // *Metals*. – 2021. – Vol. 11(4). – Article ID: 617. – <https://doi.org/10.3390/met11040617>.

7 **Thongchitruksa, N., Chianpairot, A., Hartung, F., Lothongkum, G.** Effect of molybdenum on wear resistance of Cr-Nb hard-faced S355JR steel // *Materials Testing*. – 2014. – Vol. 56(3). – P. 187–192. – <https://doi.org/10.3139/120.110616>.

8 **Li, Y., Han, J., Wang, X., Chen, W.** Effect of Al and Si complex alloying on the microstructure and mechanical properties of cast steel // *Metals and Materials International*. – 2022. – Vol. 28(1). – P. 80–89. – <https://doi.org/10.1007/s12540-021-00834-0>.

9 **Qin, H., Li, B., Zhang, X.** Effect of Ni and Cr addition on carbide precipitation in steel // *Materials Research Express*. – 2020. – Vol. 7(9). – Article ID: 096514. – <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aba4fc>.

10 **Zhang, J., Li, M., Zhao, Y., et al.** Thermodynamic analysis and microstructural evolution in microalloyed steels // *Journal of Iron and Steel Research International*. – 2021. – Vol. 28(3). – P. 324–332. – <https://doi.org/10.1007/s42243-021-00548-9>.

11 **Lukas, H. L., Fries, S. G., Sundman, B.** *Computational Thermodynamics: The CALPHAD Method*. – Cambridge: Cambridge University Press, 2007. – 320 p.

12 **Thermo-Calc Software AB.** *Thermo-Calc Software User Guide (Version 2025a)* [Computer software manual]. – Stockholm, Sweden, 2025. – [Электронный ресурс]. – <https://www.thermocalc.com>.

13 **Baranov, A. V., Shvets, N. I.** Thermodynamic assessment of phase formation in low-alloy steels // *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*. – 2020. – Vol. 41(4). – P. 456–462. – <https://doi.org/10.1007/s11669-020-00801-5>.

REFERENCES

- 1 **Bai, Q., Wang, Y., Huang, X., Cui, J.** Effect of Cr and Mo addition on the microstructure and wear resistance of high-strength steel // *Materials Science and Engineering: A*. – 2021. – Vol. 804. – Article ID: 140662. – <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.140662>.
- 2 **Wang, D., Huang, M., Li, X., et al.** Microstructure evolution and wear behavior of medium-carbon bainitic steel // *Tribology International*. – 2019. – Vol. 138. – P. 111–120. – <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.05.007>.
- 3 **Kairbekova, A. E., Baimukhamedov, K. Zh.** Vliyanie termobrabotki na strukturu i svoystva stali 40KhN3MF [Effect of heat treatment on the structure and properties of 40KhN3MF steel] // *Vestnik Karagandinskogo universiteta. Seriya: Fizika i matematika*. – 2020. – № 100(4). – P. 58–64.
- 4 **Zhang, K., Zhao, X., Liu, Y., et al.** Effect of rare earth elements on the microstructure and inclusion modification in high-strength steels // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2017. – Vol. 26(5). – P. 2295–2303. – <https://doi.org/10.1007/s11665-017-2650-7>.
- 5 **Pan, X., Luo, L., Wang, F., Zhang, J.** Refinement and strengthening mechanism in high-alloy steel modified by complex alloying // *Materials Characterization*. – 2020. – Vol. 159. – Article ID: 110020. – <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.110020>.
- 6 **Zhao, Y., Li, J., Wang, G., et al.** Influence of molybdenum on bainite transformation and mechanical properties in low-carbon steel // *Metals*. – 2021. – Vol. 11(4). – Article ID: 617. – <https://doi.org/10.3390/met11040617>.
- 7 **Thongchitrusa, N., Chianpairot, A., Hartung, F., Lothongkum, G.** Effect of molybdenum on wear resistance of Cr-Nb hard-faced S355JR steel // *Materials Testing*. – 2014. – Vol. 56(3). – P. 187–192. – <https://doi.org/10.3139/120.110616>.
- 8 **Li, Y., Han, J., Wang, X., Chen, W.** Effect of Al and Si complex alloying on the microstructure and mechanical properties of cast steel // *Metals and Materials International*. – 2022. – Vol. 28(1). – P. 80–89. – <https://doi.org/10.1007/s12540-021-00834-0>.
- 9 **Qin, H., Li, B., Zhang, X.** Effect of Ni and Cr addition on carbide precipitation in steel // *Materials Research Express*. – 2020. – Vol. 7(9). – Article ID: 096514. – <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aba4fc>.
- 10 **Zhang, J., Li, M., Zhao, Y., et al.** Thermodynamic analysis and microstructural evolution in microalloyed steels // *Journal of Iron and Steel Research International*. – 2021. – Vol. 28(3). – P. 324–332. – <https://doi.org/10.1007/s42243-021-00548-9>.
- 11 **Lukas, H. L., Fries, S. G., Sundman, B.** *Computational Thermodynamics: The CALPHAD Method*. – Cambridge: Cambridge University Press, 2007. – 320 p.
- 12 Thermo-Calc Software AB. *Thermo-Calc Software User Guide (Version 2025a)* [Computer software manual]. – Stockholm, Sweden, 2025. – [Electronic resource]. – <https://www.thermocalc.com>.

13 Baranov, A. V., Shvets, N. I. Thermodynamic assessment of phase formation in low-alloy steels // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. – 2020. – Vol. 41(4). – P. 456–462. – <https://doi.org/10.1007/s11669-020-00801-5>.

Поступило в редакцию 29.07.25.

Поступило с исправлениями 31.07.25.

Принято в печать 07.08.25.

*А. А. Туганбаева¹, С. К. Аринова², Св. С. Квон³, А. З. Исагулов⁴

^{1,2,3,4}Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,

Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.

29.07.25 ж. баспаға түсті.

31.07.25 ж. түзетулерімен түсті.

07.08.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ӘР ТҮРЛІ МОДИФИКАЦИЯДАҒЫ 40ХНЗМФ БОЛАТТАҒЫ ФАЗАЛЫҚ ӨЗГЕРІСТЕРДІ ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

Thermo-Calc (2025 нұсқасы, TCFE13 дерекқоры) бағдарламалық кешенін пайдаланып, 40ХНЗМФ маркалы құрылымдық легирленген болаттағы фазалық ауысулардың химиялық құрамын әртүрлі нұсқалар бойынша өзгерту термодинамикалық модельдеуі жүргізілді. Негізгі құрамға, 1,5 % Мо қосылған болатқа және Cr, Ni, Si, Al легирлеуші элементтерінен әрқайсысы 0,4 % мөлшерінде кешенді қосылған болатқа арналған политермиялық қималар тұрғызылып, талданды. Зерттеу молибден қосу карбидтік фазалардың (әсіресе, $M_{23}C_6$ және MC) термиялық тұрақтылығын арттыратынын, бұл қыздыру кезінде карбидтердің коалесценциясын тежей отырып, дисперсиялық бекіту мен тозуға төзімділікті көтеретінін анықтады. Кешенді легирлеуші элементтер, өз кезегімен, аустенит фазасының тұрақтылығын (Ni және Al әсерінен ерекше) арттырып, ірі карбидтер мен интерметаллды қосылыстардың түзілуін азайтып, құрылымның гомогенизациясы арқылы қорытпаның серпінділігін жоғарылатады. Жүргізілген фазалық ауысулардың талдауы толық аустениттену және негізгі карбидтік фазалардың еруі температуралық аралықтарын дәл анықтауға мүмкіндік берді. Бұл күйдіру және босату температурасын қоса алғандағы термиялық өңдеу режимдерін оңтайландырудың негізін қалады, нәтижесінде ұсақ түйірлі, берік және біртекті құрылым алынады. Модельдеу нәтижелері болат құрамын жобалауда және олардың жауапты түйіндердегі пайдалану қасиеттерін арттыру үшін термиялық өңдеу технологияларын әзірлеуде қолданыла алады.

Кілтті сөздер: болат, политермиялық кесінділер, модификаторлар, кристалдану, фаза.

**A. A. Tuganbaeva*¹, *S. K. Arinova*², *Sv. S. Kvon*³, *A. Z. Isagulov*⁴

^{1,2,3,4}Abylka Saginov Karaganda Technical University,

Republic of Kazakhstan, Karaganda

Received 29.07.25.

Received in revised form 31.07.25.

Accepted for publication 07.08.25.

THERMODYNAMIC MODELING OF PHASE TRANSFORMATIONS IN 40CRNI3MOV STEEL WITH DIFFERENT MODIFICATIONS

Thermodynamic modeling of phase transformations in the structural alloy steel 40KhN3MF under various chemical composition modifications was performed using the Thermo-Calc software package (version 2025, TCFE13 database). Polythermal sections were constructed and analyzed for the base composition, steel with 1.5 % Mo addition, and steel with a complex modification involving the addition of 0.4 % each of Cr, Ni, Si, and Al. It was established that the addition of molybdenum increases the thermal stability of carbide phases (particularly $M_{23}C_6$ and MC), which inhibits carbide coalescence upon heating, thereby promoting dispersion strengthening and enhanced wear resistance. The complex modifiers, in turn, contribute to the stabilization of the austenite phase (notably due to Ni and Al), reduction in the formation of coarse carbides and intermetallic compounds, and an increase in the alloy's plasticity owing to structural homogenization. The conducted analysis of phase transformations enabled the precise determination of the temperature ranges for complete austenitization and dissolution of the primary carbide phases. This provides a basis for optimizing heat treatment regimes (including quenching and tempering temperatures) to achieve a fine-grained, strong, and homogeneous structure. The simulation results can be utilized in designing steel compositions and heat treatment technologies to improve their service properties in critical components.

Keywords: steel, polythermal cuts, modifiers, crystallization, phase.