

Втомна витривалість високовуглецевих сталей з різною морфологією цементитної фази

С. Я. Шипицин, доктор технічних наук
В. І. Жорник*, доктор технічних наук, професор
В. В. Кулик**, кандидат технічних наук
Д. І. Лихovej, П. М. Кучеренко

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

*Об'єднаний інститут машинобудування НАН Білорусі, Мінськ

**Національний університет «Львівська політехніка», Львів

Досліджено закономірності впливу дисперсійного нітрид-ванадієвого зміцнення на механічні властивості, втомну витривалість та циклічну тріщиностійкість високовуглецевих сталей з різною морфологією цементитної фази. Встановлено, що при всіх видах морфології цементитної фази (пластинчастої, глобулярної та змішаної морфології) дисперсійне зміцнення одночасно суттєво підвищує міцність сталей, втомну витривалість і циклічну тріщиностійкість, що гарантує можливість створення нових високовуглецевих сталей з підвищеними функціональними властивостями для транспортного та інших видів машинобудування.

Для виробництва залізничних коліс та рейок застосовуються високовуглецеві нелеговані та низьковуглецеві перлітні сталі. В сталях цих класів підвищення статичної міцності за рахунок збільшення вмісту вуглецю супроводжується зниженням циклічної міцності, статичної і циклічної в'язкості руйнування, пластичності, контактної витривалості. Крім того, вони мають недостатні втомну і термовтомну міцність, теплостійкість, холодостійкість, схильність до утворення аустенітних поверхневих прошарків з подальшим їх $\gamma \rightarrow M$ перетворенням при локальному нагріві поверхневих зон до температур вище A_{c1} і A_{c3} при ковзанні і буксуванні коліс [1 – 3]. Комплекс таких властивостей зумовлює формування на рейках і колесах таких дефектів як викрихчування металу по боковій робочій поверхні головки рейки відшарування і викрихчування металу на поверхні рейки і колеса, хвилеподібна деформація голівки рейки і крихке руйнування коліс і рейок [4].

Мета роботи – дослідити можливість підвищення рівня втомної витривалості та циклічної в'язкості руйнування сталей.

Втомну витривалість сталей визначали за методом симетричного консольного вигину плоского зразка при заданій амплітуді деформації на

*В роботі брали участь Кукаренко В.А., Осташ О.П., Степанова Т.В.

Структура і фізико-механічні властивості

установці конструкції Об'єднаного інститут машинобудування НАН Білорусі [5].

Дослідні аналоги рейкових сталей (стандартна 80Г2СФ та з дисперсійним нітридним зміцненням 70Г2САФ) з початковими після аустенізації структурами перліту, бейніту, мартенситу після відпуску при 450 °С (80Г2СФ) і 600 °С (70Г2САФ) випробували до та після термоцикування за режимом: 20 °С → 500 °С – 15 хв → вода в кількості 100 циклів, який імітував циклічний тепловий вплив на поверхню рейки при експлуатації. Результати випробувань наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Результати втомних випробувань сталей до та після термоцикування

Марка сталі	Початкова структура		Максимальна напруга,	Кількість циклів до руйнування, N
			σ_{\max} , МПа	
80Г2СФ	Перліт	До термоцикування	448	$9,0 \times 10^4$
		Після термоцикування	440	$1,8 \times 10^5$
	Бейніт	До термоцикування	408	$3,0 \times 10^5$
		Після термоцикування	410	$8,0 \times 10^4$
	Мартенсит	До термоцикування	435	$6,0 \times 10^5$
		Після термоцикування	460	$2,2 \times 10^5$
70Г2САФ	Перліт	До термоцикування	450	$1,3 \times 10^5$
		Після термоцикування	455	$4,0 \times 10^5$
	Бейніт	До термоцикування	451	$4,5 \times 10^5$
		Після термоцикування	445	$3,0 \times 10^5$
	Мартенсит	До термоцикування	450	$8,0 \times 10^5$
		Після термоцикування	450	$4,9 \times 10^5$

Встановлено, що по-перше, втомна витривалість обох сталей підвищується в 5 – 6 разів при переході від початкової перлітної до бейнітної і мартенситної структури.

По-друге, дисперсійне нітридне зміцнення при всіх видах початкової структури сталей підвищує в 1,3 – 1,5 рази втомну витривалість сталі до термоцикування.

По-третє, термоцикування у випадку початкової перлітної структури обох сталей підвищує в 2,0–3,1 рази втомну витривалість, а у випадку початкової бейнітної та мартенситної структур – зменшує її в 1,5 – 3,8 рази. При цьому дисперсійне нітридне зміцнення від 2-х до 3-х разів

Структура і фізико-механічні властивості

підвищує збільшення втомної витривалості термоцикуванням сталі з початковою перлітною структурою та зменшує її від 3,8 до 1,5 при початковій бейнітній структурі та з 2,7 до 1,6 разів при початковій мартенситній структурі.

Встановлені закономірності зміни втомної витривалості сталей пов'язані із впливом дисперсійного нітридного зміцнення на механічні властивості сталей, на формування їх початкових мікро- та тонкої структури і трансформації цих структур при термоцикуванні і в зоні циклічних знакозмінних навантажень при випробуваннях на втомну витривалість.

Відомо, що втомна міцність та витривалість характеризують умови руйнування під дією зовнішніх періодично змінюваних напружень, які не перевищують межі пружності металу. Зовнішнє навантаження, яке викликає втомне руйнування, може бути розтягуючим, стискаючим чи зсувним, а також комбінацією цих видів напружень. Хоча за значенням ці напруження недостатні для розвитку пластичної деформації у всьому зразку чи виробі, після багатократних повторень настає руйнування. Покращення співвідношення властивостей міцності і пластичності високовуглецевих сталей при легуванні азотом і ванадієм досягається за рахунок диспергування початкових структур перліту, бейніту, мартенситу та їх структур відпуску, зменшення розмірів блоків когерентного розсіювання та підвищення щільності дислокацій в тонкій структурі сталей та додаткового дисперсійного зміцнення фериту нанорозмірними частинками нітриду ванадію.

Термоцикування обох сталей з початковою структурою бейніту та мартенситу зменшує їх втомну витривалість, а з перлітною структурою, навпаки – підвищує. Це пов'язано з впливом трансформації структури сталей при термоцикуванні. У відпущених сталях з початковою бейнітною і мартенситною структурами, в яких цементитна фаза вже має сферичну форму, термоцикування призводить тільки до її зростання (табл. 2). Режим термоцикування: 20 °С → 550 °С – 8 год → вода – 9 циклів.

Таблиця 2

Розмір сферичних цементитних частинок в сталях до та після термоцикування

Марка сталі	Початкова структура	Розмір частинок Fe ₃ C, мкм	
		до	після
80Г2СФ	Бейніт	0,9	1,3
	Мартенсит	1,1	1,3
	Перліт	1,4	1,7
70Г2САФ	Бейніт	0,7	1,1
	Мартенсит	0,8	1,2
	Перліт	1,0	1,2

В сталях з початковою структурою перліту термоцикування вже призводить до часткової трансформації пластинчастого цементиту в перліті до сферичного цементиту. На рис. 1 наведено структури сталей 80Г2СФ і 70Г2САФ з початковими структурами перліту, бейніту та мартенситу до та

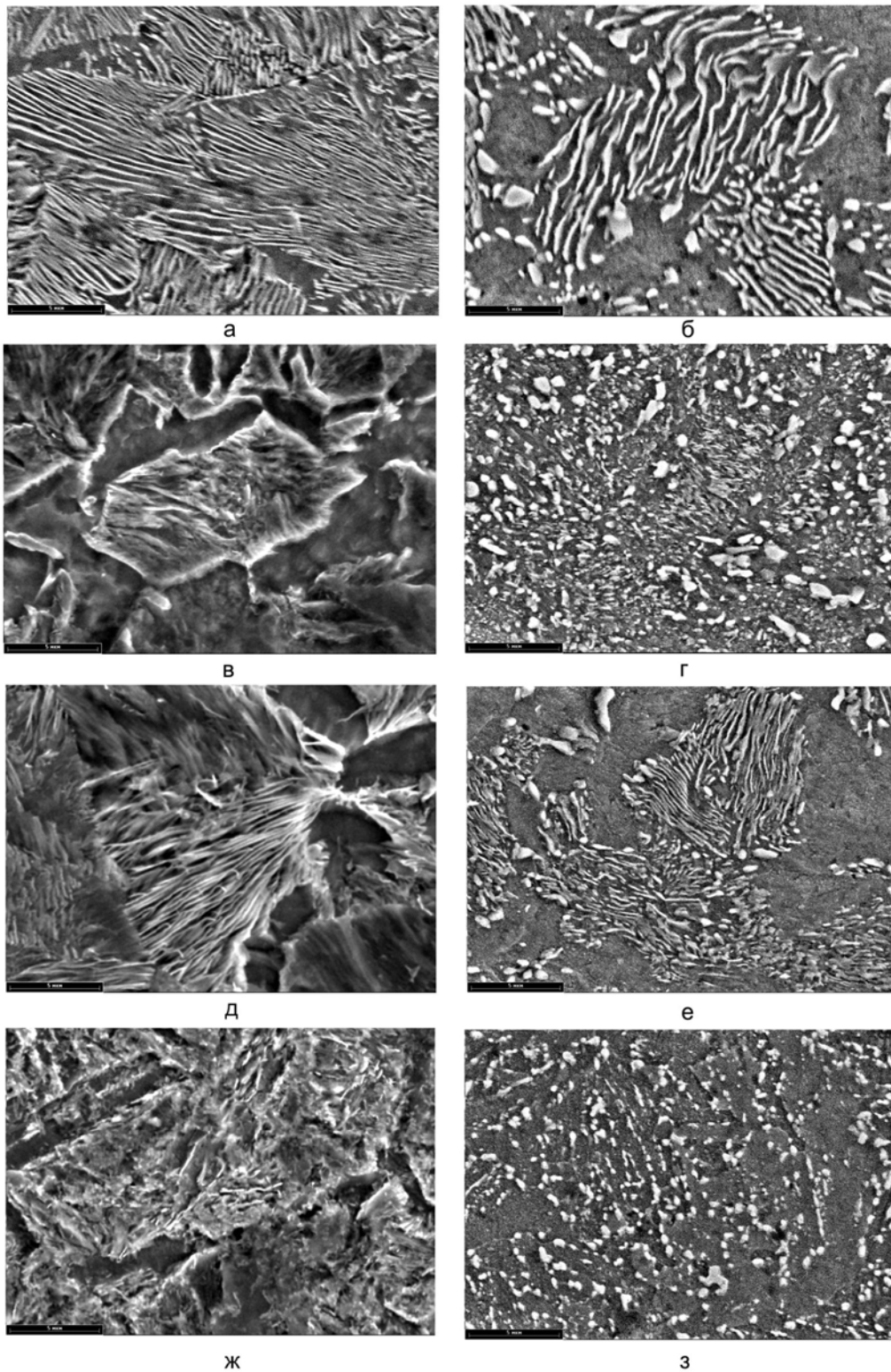


Рис. 1. Структура сталей 80Г2СФ (а, б, в, г) та 70Г2САФ (д, е, ж, з) з початковою структурою перліту (а, б, д, е) і мартенситу (в, г, ж, з) до (а, в, д, ж) та після термоцикування (б, г, е, з) (x5000).

Структура і фізико-механічні властивості

після термоциклування за режимом $20\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 550\text{ }^{\circ}\text{C} - 8\text{ год} \rightarrow \text{вода} - 9\text{ циклів}$, який є значно більш жорстким за температурою та часовою витримкою, ніж режим $20\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 500\text{ }^{\circ}\text{C} - 15\text{ хв} \rightarrow \text{вода} - 100\text{ циклів}$, що був застосований для зразків на випробування втомної витривалості.

Це зроблено з метою більшої наочності трансформування структури при термоциклуванні.

Зміна пластинчастої на сферичну форму цементиту, як відомо [7, 8], вже є одним із чинників підвищення втомної витривалості металу. При всіх видах початкової структури, дисперсійне зміцнення нанорозмірними частинками нітриду ванадію, які додатково виділяються при термоциклуванні, роблять позитивний внесок в підвищення втомної витривалості металу.

В зоні дії знакозмінного навантаження при випробуванні на втомну витривалість, відбувається зміна структури металу. При всіх видах початкової структури (перліт, бейніт, мартенсит) фіксується зона розчинення і виділення більш дисперсних частинок цементиту (рис. 2). Рентгенофазовий аналіз показав, що в цій зоні не формується аустенітна фаза, в якій термодинамічно вірогідне розчинення цементиту. Це вказує на те, що розчинення та виділення більш дисперсних частинок цементиту пов'язані із підвищенням швидкісним навантаженням та розвантаженням металу дифузійної рухливості елементів втілення та їх масоперенесення навіть без підвищення температури зразків вище кімнатної [9]. В наших дослідженнях втомної витривалості частота знакоперемінного навантаження зразків складала близько 25 Гц. Дисперсійне нітрид-ванадієве зміцнення гальмує процес розчинення цементитної фази. Так зона розчинення в сталі 80Г2СФ складає 490 – 530 мкм, а в сталі 70Г2САФ – 240 – 270 мкм, незважаючи на те, що кількість циклів до руйнування у другій 1,5 рази більша ніж у першій. Це свідчить про суттєве зниження дифузійної рухливості і масопереносу вуглецю за рахунок, як ми вважаємо, наявності дифузійних «пасток», якими є міжфазні границі, нітрид-феритна матриця і зони викривлення кристалічної ґратки з компонентами стиснення біля нітридних частинок [6, 10].

Підвищення дисперсійним нітридним зміцненням втомної витривалості високовуглецевих сталей забезпечує і підвищення їх циклічної тріщиностійкості.

Визначення циклічної тріщиностійкості проводили за методикою [11] на компактних зразках. Дисперсійне нітридне зміцнення при всіх типах початкової структури (перліт, бейніт, мартенсит) і в усьому температурному інтервалі відпуску,

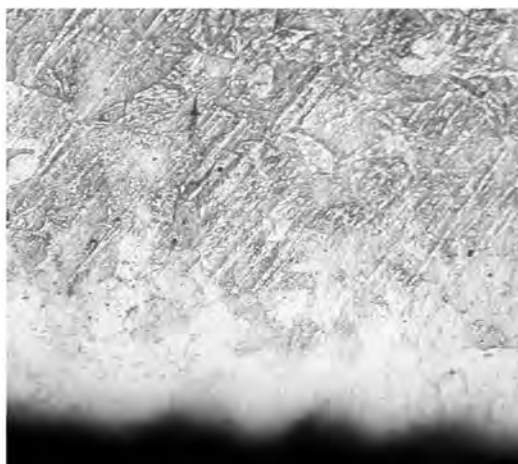


Рис. 2. Мікроструктура сталі 70Г2САФ з початковою перлітною структурою в зоні впливу знакозмінного навантаження при випробуванні на втому (x250).

Структура і фізико-механічні властивості

який можливий та застосовується в промисловості для високовуглецевих сталей 450 – 600 °С, при близьких значеннях пластичності і ударної в'язкості суттєво підвищує характеристики міцності як при розтягненні, так і стисненні. Найбільш ефективно дисперсійне нітридне зміцнення підвищує міцність сталі з початковою структурою перліту (підвищення σ_T складає 25 – 30 %).

Термоциклування з верхньою температурою нагрівання, яка є близькою до температури евтектоїдного $\alpha(\text{П, Б, М}) \rightarrow \gamma$ перетворення, суттєво не впливає на рівень міцності сталей. Ефект підвищення міцності сталі за рахунок дисперсійного нітридного зміцнення при цьому зберігається.

Втомна витривалість високовуглецевих сталей підвищується в 5 – 6 разів при зміні початкової структури від перлітної до бейнітної і мартенситної. Дисперсійне нітридне зміцнення при всіх видах початкової структури підвищує в 1,3 – 1,5 рази втомну витривалість сталей, що є наслідком покращення співвідношення властивостей міцності, пластичності та в'язкості за рахунок диспергування початкових структур та їх структур відпуску, зменшення розмірів блоків когерентного розсіювання та підвищення щільності дислокацій у фериті та додаткового дисперсійного зміцнення фериту нанорозмірними частинками нітриду ванадію. Таке зміцнення практично вирівнює втомну витривалість високовуглецевих сталей з початковими структурами перліту та відпущеного мартенситу, але останні все ж таки за цим показником переважають на 20 – 30 %.

Циклічне теплове навантаження з рівнем температури циклу, що наближається до температура A_{c1} , суттєво впливає на втомну витривалість сталей. При початковій структурі бейніту та мартенситу вона зменшується у 1,5 – 3,8 рази, а при початковій перлітній структурі – навпаки – збільшує втомну витривалість у 2,0 – 3,1 рази. При цьому дисперсійне нітридне зміцнення зменшує зниження втомної витривалості сталей з початковою структурою бейніту та мартенситу в 3,0 – 3,5 рази, та підвищує її у 2 – 3 рази в сталях з початковою структурою перліту. Головним чином, ці закономірності пов'язані із впливом циклічного теплового навантаження на структуру сталей і, зокрема, на зміну розмірів та трансформацію цементитної фази.

Дисперсійне нітридне зміцнення підвищує в 2,0 – 2,5 рази зносостійкість сталей як з початковою структурою мартенситу, так і пластинчастого перліту. Рівень їх зносостійкості практично не відрізняється. Це пов'язано з підвищенням дисперсійним нітридним зміцненням теплостійкості і втомної витривалості сталей.

Циклічне силове навантаження викликає зміну структурного стану сталей.

Зокрема, трансформації пластинчастої цементитної фази в перліті на сферичну та її розчинення в сталях з початковою бейнітною та мартенситною структурами. Перший процес повинен підвищувати втомну витривалість металу, а другий – її зменшувати. Механізм та закономірності цих процесів потребують додаткових фундаментальних досліджень.

Таким чином показано, що рівень втомної витривалості високовуглецевих сталей при циклічному силовому та тепловому впливі

Структура і фізико-механічні властивості

визначається параметрами початкової структури перлітних, бейнітних і мартенситних сталей, їх трансформації та деформації при силовому та тепловому впливі.

Встановлено можливість суттєвого підвищення втомної витривалості сталей за рахунок їх легування азотом і ванадієм, що забезпечує диспергування початкових структур сталей та їх стабільність при термічній обробці та при циклічному силовому і тепловому навантаженні, покращення співвідношення властивостей міцності, пластичності і в'язкості. Це відкриває перспективу створення нових марок високовуглецевих сталей з одночасним підвищенням в 2 – 3 рази рівнем механічних властивостей та втомної витривалості.

Література

1. Гетманова М.Е., Гриншпон А.С., Сухов А.В. Влияние неоднородности структуры и неметаллических включений на вязкость разрушения колесной стали // Сталь. – 2007. – № 9. – С.96 – 99.
2. Остащ О.П., Андрейко І.М., Кулик В.В. Втомна довговічність сталей залізничних коліс // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2007. – № 3. – С.93 –102.
3. Кассиді Ф.Д. Леговані метали можуть подовжити життя коліс // Залізничний транспорт України. – 2002. – № 5. – С. 69 – 70.
4. Матвеев В.В. Восстановление железнодорожных колес наплавкой // Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. – 2007. – 152 с.
5. Беспалов С.А. Металловедческие аспекты в процессах разрушения металлических материалов при трении // Успехи физики металлов. – 2009. – 10. – №4. – С. 415 – 436.
6. Головин С.А., Пушнар А. Микропластичность и усталость металлов. – М.: Металлургия, 1980. – 240 с.
7. Шур Е.А., Бычкова Н.Я., Марков Д.П., Кузьмин Н.Н. // Трение и износ. – 16, №1:80(1995).
8. Раузин Я.Р., Шур Е.А., Носков М.М. Металловедение и термическая обработка металлов, № 9:20 (1969).
9. Кудрявцев П.И. Нераспространяющиеся усталостные трещины. – М.: Машиностроение, 1982. – 171 с.
10. Бабаскин Ю.З., Шипицын С.Я., Афгандиянц Е.Г. Экономное легирование стали. – Киев: Наукова думка. – 1987. – 188с.
11. Арсенкин А.М., Далматов А.Ю., Демин К.Ю., и др. Микролегирование колесной стали карбидообразующими элементами // Сталь. – 2007. – № 9. – С.29 – 30

Referenses

1. Getmanova M.Ye., Grinshpon A.S., Sukhov A.V i dr. Vliyaniye neodnorodnosti struktury i nemetallicheskih vklyucheniy na vyazkost' razrusheniya kolesnoy stali // Stal'. – 2007. – № 9. – S. 96 – 99.
2. Ostash O.P., Andreyko H.M., Kulik V.V. ta insh. Vtomna dovgovichnist' staley zaliznichnikh kolis // Fiziko-khimichna mekhanika materialiv. – 2007. – № 3. – S. 93 – 102.
3. Kassidi F.D. Legovani metali mozhut' podovzhiti zhittya kolis // Zaliznichniy transport Ukraini. 2002. –№ 5. – S. 69 – 70.

4. Matveyev V.V. Vosstanovleniye zheleznodorozhnykh koles naplavkoy // Kiyev: IES im. Ye.O. Patona NAN Ukrainy. 2007. – 152 s.
5. Bepalov S.A. Metallovedcheskiye aspekty v protsessakh razrusheniya metallicheskih materialov pri trenii // Uspekhi fiziki metallov. – 2009. tom 10. – № 4. – S. 415 – 436.
6. Golovin S.A., Pushnar A. Mikroplastichnost' i ustalost' metallov. – M.: Metallurgiya, 1980. – 240 s.
7. Shur Ye.A., Bychkova N.Ya., Markov D.P., Kuz'min N.N. Treniye i iznos. – 16, №1:80(1995).
8. Rauzin Ya.R., Shur Ye.A., Noskov M.M. Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov, №9:20 (1969).
9. Kudryavtsev P.I. Nerasprostranyayushchiyesya ustalostnyye treshchiny. – M.: Mashinostroyeniye, 1982. – 171 s.
10. Babaskin Yu.Z., Shipitsyn S.Ya., Aftandilyants Ye.G. Ekonomnoye legirovaniye stali. – Kiyev: Naukova dumka. – 1987. – 188 s.
11. Arsenkin A.M., Dalmatov A.YU., Demin K.YU., i dr. Mikrolegirovaniye kolesnoy stali karbidoobrazuyushchimi elementami // Stal'. – 2007. – № 9. – S.29 – 30.

Одержано 29.01.18

С. Я. Шипицин, В. І. Жорник, В. В. Кулик, Д. І. Лиховой, П. М. Кучеренко

Усталостная выносливость высокоуглеродистых сталей с различной морфологией цементитной фазы

Резюме

Исследованы закономерности влияния дисперсионного нитрид-ванадиевого упрочнения на механические свойства, усталостную выносливость и циклическую трещиностойкость высокоуглеродистых сталей с различной морфологией цементитной фазы. Установлено, что при всех видах морфологии цементитной фазы (пластинчатой, глобулярной и смешанной морфологии) дисперсионное упрочнение одновременно существенно повышает прочность сталей, усталостную выносливость и циклическую трещиностойкость, что гарантирует возможность создания новых высокоуглеродистых сталей с повышенными функциональными свойствами для транспортного и других видов машиностроения.

S. Ya. Shipitsin, V.I. Zhornik, V. V. Kulyk, P. M. Kucherenko, D. I. Lihovy

Humidified survival of high-carbon steels with different morphology of cement compound phase

Summary

The laws of the influence of dispersion nitride-vanadium hardening on mechanical properties, fatigue endurance and cyclic fracture resistance of high-carbon steels with different morphology of cementite phase are investigated. It has been established that in all types of morphology of the cementite phase (lamellar, globular and mixed morphology), the dispersion hardening simultaneously significantly increases the strength of steels, fatigue endurance and cyclic fracture resistance, which guarantees the possibility of creating new high-carbon steels with increased functional properties for transport and other types of machine building.