

2 БЕЗОПАСНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА И СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

УДК 62-567.143-666.9.015.64

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА СВОЙСТВА РЕССОРНО-ПРУЖИННЫХ СТАЛЕЙ

С. Н. АБСАТТАРОВ, Н. К. ТУРСУНОВ

Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан

Стали, используемые для изготовления пружин, должны обладать высокой устойчивостью к малым пластическим деформациям, пределом выносливости и стойкостью к релаксации, при этом обеспечивая достаточную пластичность и вязкость. Для достижения этих свойств сталь должна содержать более 0,5 % углерода и подвергаться термической обработке, такой как закалка и отпуск, или деформационному упрочнению.

Легирование сталей позволяет повысить температуру отпуска, что помогает избежать развития необратимой отпускной хрупкости. Это, в свою очередь, способствует сочетанию высокого сопротивления малым пластическим деформациям с хорошими пластичностью и вязкостью [1]. Часто для изготовления пружин и рессор используют легированные стали, содержащие 1,5–2,8 % кремния, 0,6–1,2 % марганца, 0,2–1,2 % хрома, 0,1–0,25 % ванадия, 0,8–1,2 % вольфрама и 1,4–1,7 % никеля. Эти элементы улучшают прокаливаемость, повышают стойкость к релаксации и предел упругости стали [1]. Легирующие элементы также влияют на процесс обезуглероживания, изменяя скорость диффузии углерода и толщину обезуглероженного слоя, а также воздействуют на температуру альфа-гамма-превращения и активность углерода [2].

В промышленности чаще всего применяют кремнистые стали, такие как 50ХГФА, 55С2, 60С2А, 60С2ХФА, 65С2ВА и 70С3А. Кремний в составе этих сталей повышает прокаливаемость, замедляет распад мартенсита при отпуске и значительно упрочняет феррит. Благодаря этому стали 50С2, 55С2 и 60С2 обладают высокими пределами текучести и упругости, что обеспечивает отличные эксплуатационные свойства. Однако кремнистые стали склонны к графитизации при содержании кремния выше 2,5 % и к обезуглероживанию при горячей обработке, что может снижать предел выносливости [3, 4]. Дополнительное легирование кремнистых сталей элементами, такими как хром, марганец, вольфрам и никель, повышает прокаливаемость и уменьшает склонность к обезуглероживанию, графитизации и росту зерна при нагреве [1].

Углерод, являющийся основным легирующим элементом в стали, растворяется в кристаллической решетке, хотя его растворимость в железной матрице невелика. В ферритной матрице насыщение уг-

леродом достигается при минимальном содержании легирующих элементов. Растворенный углерод снижает модуль упругости стали по мере увеличения содержания легирующих элементов [5]. Если концентрация углерода превышает уровень насыщения, избыточный углерод выпадает в осадок в виде цементита, модуль упругости которого составляет около 170 ГПа [6].

Влияние растворенных легирующих элементов, таких как рений, кобальт, хром, иридий, рутений, кремний, марганец, никель, родий и платина, на модуль упругости стали проиллюстрировано на рисунке 1 [7]. Небольшое увеличение модуля упругости наблюдается при повышении содержания рения, кобальта или хрома.

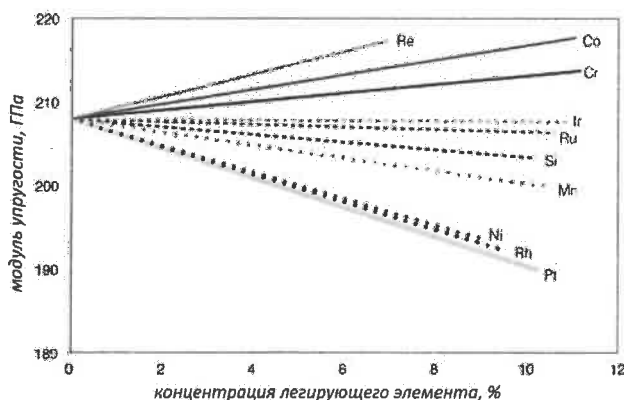


Рисунок 1 – Влияние легирующих элементов на модуль упругости стали [8]

Механизм легирования, влияющий на модуль упругости стали, действует по двум направлениям. Во-первых, включение атомов легирующих элементов с радиусами, отличающимися от радиуса железа, в кристаллическую решетку железа (Fe) изменяет межатомные расстояния. Это, в свою очередь, воздействует на модуль упругости, так как он определяется как вторая производная потенциальной энергии по отношению к межатомным расстояниям. Во-вторых, легирование изменяет распределение электронов в материале, что также оказывает влияние на модуль упругости. Эти два механизма могут либо усиливать, либо компенсировать друг друга в зависимости от свойств легирующего элемента и его положения в периодической таблице элементов [8].

Марганец (Mn) играет важную роль в стабилизации фазы γ -Fe (аустенит), повышая устойчивость аустенита и уменьшая критическую скорость закалки. В ферритной фазе марганец повышает предел прочности и текучести, особенно при содержании углерода от 0,1 до 0,5 %. Однако он снижает пластичность и ударную вязкость стали. Марганец также улучшает износостойкость и упругость, что делает его важным элементом для легирования конструкционных, пружинно-рессорных и износостойких сталей. В некоторых случаях марганец используется как более доступная и недорогая замена никеля [9].

Исследования, проведенные Wada и его коллегами [10–12], показали, что марганец снижает коэффициент активности углерода в аустените. Это замедляет диффузию углерода. В отличие от марганца кремний (Si) оказывает противоположное влияние, увеличивая коэффициент диффузии углерода в аустените [13].

Легирование стали марганцем, как и многими другими элементами, приводит к улучшению технологических и эксплуатационных характеристик только в сочетании с правильной термической обработкой. Без термообработки легирование не приносит значительных улучшений, а затраты на процесс могут не оправдаться [9].

Хром (Cr) является одним из самых распространенных легирующих элементов. Он повышает прочность, твердость и коррозионную стойкость стали, хотя и может несколько снижать ее пластичность. Высокое содержание хрома делает сталь нержавеющей и сохраняет ее магнитные свойства стабильными. Хром также влияет на скорость окисления и уменьшает склонность к обезуглероживанию за счет снижения скорости диффузии углерода [9].

Ванадий (V) добавляется в сталь для улучшения ее механических свойств и повышения износостойкости. Образую карбиды и нитриды, ванадий способствует измельчению зерна и повышает твердость, а также ударную вязкость стали [9].

Ванадий является одним из ключевых легирующих элементов, используемых в рессорно-пружинных сталях для обеспечения однородной и мелкодисперсной зеренной структуры. Его добавление существенно влияет на ряд процессов, происходящих при термической обработке стали. Во-первых, ванадий способствует измельчению зерен микроструктуры, что значительно улучшает механические свойства стали, включая прочность и ударную вязкость.

Одним из важных эффектов ванадия является его способность контролировать процессы в нижней части аустенитной области. Он замедляет рост зерен аустенита, стабилизирует структуру стали при термомеханической обработке и повышает температуру рекристаллизации. Влияние ванадия на γ , α -превращения обеспечивает более стабильную микроструктуру и повышает механические характеристики стали.

С точки зрения электронной структуры ванадий не обладает р-электронами, но имеет незаполненные d-орбитали, что приводит к снижению термодинамической активности углерода при легировании стали. Это изменение способствует образованию высокодисперсных соединений ванадия, таких как карбиды, нитриды и карбонитриды. Эти соединения, имея округлую форму, равномерно распределяются по границам зерен, предотвращая их рост и способствуя упрочнению стали [14].

При содержании ванадия в пределах от 0,001 до 0,10 % эффективно уменьшается размер зерен стали, задерживается их рост во время рекристаллизации при высоких температурах. Это делает ванадий ценным элементом в составе сталей, используемых для пружин и рессор, где важны высокая прочность, износостойкость и стабильность механических свойств.

Дополнительное легирование стали хромом, ванадием и никелем оказывает комплексное положительное влияние на ее свойства. Во-первых, такое легирование снижает критическую скорость

охлаждения, что позволяет улучшить прокаливаемость стали, обеспечивая более равномерное формирование твердой и прочной структуры по всему объему материала.

Карбидообразующие элементы, такие как **хром** и **ванадий**, играют важную роль в предотвращении *обезуглероживания* пружин при нагреве перед закалкой, что особенно важно для сохранения поверхностных свойств и общей прочности изделия. Ванадий, в свою очередь, дополнительно способствует увеличению прочности стали за счёт образования мелкодисперсных карбидных частиц типа MC, основанных на VC. Эти карбиды формируются при распаде мартенсита во время отпуска и эффективно упрочняют сталь, повышая её выносливость и релаксационную стойкость.

Никель оказывает положительное влияние на углеродную активность и способствует ускорению его диффузии в аустените, что улучшает процессы, связанные с термообработкой стали. Хотя никель практически не влияет на скорость образования окалины, он способствует быстрому формированию прочных металлических промежуточных слоев, что обеспечивает защиту стали от дальнейшего окисления.

Кроме того, никель снижает температуру α , γ -превращения, что уменьшает склонность стали к обезуглероживанию, особенно при высокотемпературной обработке. Важно отметить, что добавление никеля в количестве 0,05–0,30 % нейтрализует отрицательные воздействия меди, присутствующей в виде примеси, которая может вызывать образование трещин на поверхности стали во время горячей прокатки. Никель также помогает поглощать газы, такие как водород, что предотвращает образование газовых пузырей в слитках и снижает вероятность трещин по границам зерен в случае крупнозернистой структуры стали.

Высокое содержание **серы** в стали (до 0,035 %) отрицательно сказывается на трещиностойкости готовых пружин. Это связано с образованием сульфидных неметаллических включений (СЭВ) по границам зерен. При горячей деформации в диапазоне температур от 950 до 1200 °С они способствуют образованию трещин и разрывов. Поэтому содержание серы в сталях для высоконагруженных пружин ограничено 0,025 % [15]. Сера также глобулирует сульфидные включения и участвует в формировании уровня пластичности стали, способствуя образованию стружки при механической обработке [14].

Фосфор – неизбежная примесь в стали, которая оседает по границам зерен, снижая ударную вязкость и приводя к хрупкому разрушению из-за ослабления межзеренных связей. Поэтому содержание фосфора ограничено 0,025 мас. % [16]. Во время закалки и отпуска фосфор образует места соединения с такими элементами, как хром или марганец, вдоль границ бывших аустенитных зерен. Это приводит к снижению сцепления по границам зерен и межкристаллитному охрупчиванию, что крайне отрицательно сказывается на прочности и стойкости к усталостной нагрузке на воздухе. Эти эффекты оказывают еще более негативное влияние на достижение высокой прочности при растяжении и твердости. Для одновременного достижения высокой прочности на растяжение, высокой твердости, а также хорошей усталостной прочности на воздухе и коррозионной стойкости в пружинной стали содержание фосфора должно быть как можно более низким (не более 0,015 %, предпочтительно 0,010 %).

Микролегирование **медью** основано на ее способности кристаллизоваться в последнюю очередь и концентрироваться вдоль границ зерен, снижая вероятность перегрева и повышая пластичность стали. Кроме того, медь повышает коррозионную стойкость, хотя ее эффект становится заметен только при концентрациях выше 0,15 %. Однако, если содержание меди превышает 0,20 %, хрупкие фазы меди могут привести к растрескиванию границ зерен при деформации. Медь – это упрочняющий элемент в виде твердого раствора, который можно добавлять в сталь наряду с другими элементами, повышающими ее прочность и твердость. Поскольку медь не соединяется с углеродом, она укрепляет сталь, не образуя крупных и твердых карбидов, которые могут снизить усталостную прочность на воздухе [17].

Содержание **кислорода** должно составлять от следовых количеств до 0,0020 %. Кислород является неизбежной примесью в сталях, которая в сочетании с раскислителями может образовывать крупные, твердые и неправильной формы включения или более мелкие, но более длинные скопления, которые отрицательно влияют на усталостную прочность на воздухе. Эти эффекты, в

частности, снижают прочность на растяжение и твердость. Для достижения баланса между высокой прочностью на растяжение, твердостью и усталостной прочностью как на воздухе, так и в агрессивных средах содержание кислорода в стали не должно превышать 0,0020 %.

Содержание азота должно быть в пределах от 0,0020 до 0,0110 %. Регулирование содержания азота в этих пределах необходимо для образования мелкодисперсных нитридов, карбидов или субмикроскопических карбонитридов при взаимодействии с титаном, ниобием, алюминием или ванадием, что способствует измельчению зерен. Минимальное содержание азота должно составлять 0,0020 %, а верхний предел не должен превышать 0,0110 %, чтобы избежать образования крупных твердых нитридов или карбонитридов титана размером более 20 мкм, которые могут образовываться на глубине $1,5 \pm 0,5$ мм от поверхности стержней, предназначенных для изготовления пружин. Эта глубина имеет решающее значение с точки зрения усталостных напряжений. Большое количество нитридов или карбонитридов может значительно снизить усталостную прочность стали при высоких значениях прочности и твердости.

На основании теоретических исследований показано, что легирующие элементы, такие как углерод, марганец, кремний, хром, ванадий и никель, играют ключевую роль в улучшении прочности, упругости и других эксплуатационных свойств пружинных сталей. Термическая обработка, как и легирование, существенно влияет на конечные свойства материалов, особенно на их прокаливаемость и стойкость к обезуглероживанию. Внедрение таких элементов способствует улучшению механических свойств, повышению износостойкости и долговечности рессорно-пружинных изделий.

Список литературы

- 1 Лахтин, Ю. М. *Материаловедение : учеб. для студентов машиностроительных специальностей вузов* / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – 1980. – 493 с.
- 2 Бургонова, О. Ю. Влияние легирующих элементов на обезуглероженный слой пружинной стали / О. Ю. Бургонова, Н. В. Мамонов, Н. В. Колягина // *Техника и технологии машиностроения*. – 2017. – С. 148–152.
- 3 Chen, Y. R. Decarburization of 60Si2MnA in 20 Pct H₂ ON₂ at 700° C to 900° C / Y. R. Chen, F. Zhang, Y. Liu // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2020. – Vol. 51. – P. 1808–1821.
- 4 Effects of temperature and oxygen concentration on the characteristics of decarburization of 55SiCr spring steel / Y. Liu [et al.] // *ISIJ International*. – 2014. – Vol. 54, no. 8. – P. 1920–1926.
- 5 Bohnenkamp, U. Evaluation of the elastic modulus of steels / U. Bohnenkamp, R. Sandström // *Steel Research*. – 2000. – Vol. 71, no. 3. – P. 94–99.
- 6 Young's modulus of single-phase cementite / H. Mizubayashi [et al.] // *Scripta materialia*. – 1999. – Vol. 40, no. 7. – P. 773–777.
- 7 Speich, G. R. Elastic constants of binary iron-base alloys / G. R. Speich, A. J. Schwoeble, W. C. Leslie // *Metallurgical Transactions*. – 1972. – Vol. 3. – P. 2031–2037.
- 8 Münstermann, S. Influencing parameters on elastic modulus of steels / S. Münstermann, Y. Feng, W. Bleck // *Canadian Metallurgical Quarterly*. – 2014. – Vol. 53, no. 3. – P. 264–273.
- 9 Makeев, Д. Н. Влияние вводимых легирующих элементов на свойства стали / Д. Н. Makeев // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. – 2012. – Т. 3, № 1 (67). – С. 92–98.
- 10 Thermodynamics of the fcc Fe-Mn-C and Fe-Si-C alloys / T. Wada [et al.] // *Metallurgical Transactions*. – 1972. – Vol. 3. – P. 1657–1662.
- 11 Activity of carbon and solubility of carbides in the FCC Fe-Mo-C, Fe-Cr-C, and Fe-V-C alloys / T. Wada [et al.] // *Metallurgical and Materials Transactions B*. – 1972. – Vol. 3. – P. 2865–2872.
- 12 Thermodynamics of the fcc Fe-Ni-C and Ni-C alloys / T. Wada [et al.] // *Metallurgical and Materials Transactions B*. – 1971. – Vol. 2. – P. 2199–2208.
- 13 Effects of Mn and Si on the ferrite decarburization of spring steel / H. Wang [et al.] // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2023. – Vol. 27. – P. 363–371.
- 14 Пат. № RU 2479646, МПК C21D8/06. Сортовой прокат горячекатаный из рессорно-пружинной стали / А. Б. Соляников, М. А. Полянский, Е. Ю. Преин, В. А. Гребцов, А. В. Шрейдер, Л. В. Четверикова ; заявитель и патентообладатель ОАО «Металлургический завод имени А.К. Серова». – № 2012100196/02 ; заявл. 10.01.2012 ; опубл. 20.04.2013.
- 15 Пат. № RU 2324761, МПК C22C38/34. Сталь рессорно-пружинная легированная / И. В. Потапов, Н. А. Шляхов, Е. И. Гонтарук, А. А. Угаров, А. А. Лехтман, В. И. Фомин ; заявитель и патентообладатель ОАО «Оскольский электрометаллургический комбинат» (ОАО «ОЭМК»). – № 2006121698/02 ; заявл. 19.06.2006 ; опубл. 20.05.2008.
- 16 Пат. № RU 2370565 C2. Сталь для винтовых пружин с диаметром прутков 27–33 мм и пружина, изготовленная из нее / А. П. Андреев, А. А. Андреев, В. Н. Бочкарев, В. А. Чижов, В. М. Федин, А. И. Борц, Б. К. Ушаков, С. А. Решетников, И. С. Мулюкин, В. В. Мацкевич. – № 2007132482/02 ; заявл. 29.08.2007 ; опубл. 20.10.2009.
- 17 Patent ME-01062-B. Spring steel, procedure for fabrication of spring out of this steel and spring out of this steel / Esi Kh.N., Kavita K., Mugen Zh., Langijom Zh. – Priority Date 15.12.2005; Filing Date 11.12.2006; Publication Date 20.10.2012.