

УДК 669.15-194.55

В.И. Громов<sup>1</sup>, Н.А. Якушева<sup>1</sup>, И.Л. Полунов<sup>1</sup>

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
НА УРОВЕНЬ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
МАРТЕНСИТОСТАРЕЮЩИХ СТАЛЕЙ  
СИСТЕМЫ ЛЕГИРОВАНИЯ Fe–Ni–Mo–Ti–Al**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-2-2

*Исследованы характеристики механических свойств мартенситостареющих сталей системы легирования Fe–Ni–Mo–Ti–Al, отличающихся содержанием Ti, после различной термической обработки. Определены технологические параметры старения, обеспечивающие оптимальное сочетание прочностных свойств сталей и их уровня ударной вязкости. Приведены микроструктуры сталей при различных режимах термической обработки. Установлены зависимости механических свойств от размеров поперечного сечения прутков. Определено влияние титана на уровень механических свойств сталей.*

**Ключевые слова:** механические свойства, мартенситостареющие стали, термическая обработка, микроструктура, старение, прочность, ударная вязкость, интерметаллидная фаза, коагуляция, поперечное сечение, степень деформации.

*Studied the characteristics of the mechanical properties of maraging steels in the alloying system Fe–Ni–Mo–Ti–Al, wherein the content of Ti after different heat treatment. Determined the technological parameters of aging, providing an optimal combination of strength properties of steels and their level of impact strength. Given microstructure steels under different heat treatment conditions. Described the dependences of mechanical properties from the cross-sectional dimensions of rods. Studied the influence of titanium on the mechanical properties of steels.*

**Keywords:** mechanical properties, maraging steel, heat treatment, microstructure, aging, toughness, impact strength, intermetallic phase, coagulation, cross-sectional, degree of deformation.

---

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

### Введение

Разработка новых материалов и технологий производства из них различных изделий в настоящее время является актуальной задачей для развития авиационной и космической техники, а также других высокотехнологичных отраслей машиностроения [1–3].

В настоящее время большое внимание уделяется разработке новых сталей, способных работать в условиях низких температур, воздействия вибраций, длительных нагрузок и др. По этим причинам к данным сталям предъявляется ряд требований, таких как повышенная прочность в сочетании с высокой вязкостью и пластичностью, малая чувствительность к концентрации напряжений, хорошая свариваемость, низкая склонность к хрупкому разрушению [4]. Важным параметром при изготовлении изделий авиационной техники является также их высокая весовая эффективность, для повышения которой большой интерес представляет использование высокопрочных

конструкционных особонизкоуглеродистых мартенситостареющих сталей системы Fe–Ni–Co–Mo–Ti (Fe–Ni–Mo–Ti) с пределом прочности от 1570 до 2400 МПа [5, 6].

Низкое содержание углерода в этих сталях (не более 0,03% (по массе)) и легирование их никелем и кобальтом обеспечивают получение высокопластичного мартенсита [7–9]. Старение в пластичной матрице позволяет получить оптимальное сочетание высоких прочностных и пластических свойств, а также высокое сопротивление хрупкому разрушению путем выделения при последующей термообработке интерметаллидных фаз, таких как NiTi, Ni<sub>3</sub>Ti, NiAl, (FeNi)Al, Fe<sub>2</sub>Mo, Ni<sub>3</sub>Mo и др. [10–14]. Представляет интерес также рассмотреть зависимости уровня механических свойств мартенситостареющих сталей от размера поперечного сечения прутков.

В данной работе рассматриваются мартенситостареющие стали системы легирования Fe–Ni–Mo–Ti–Al, отличающиеся содержанием титана. Минимальные механические свойства данных марок сталей согласно ТУ приведены в таблице.

**Механические свойства сталей системы легирования Fe–Ni–Mo–Ti–Al**

Содержание титана в стали, % (по массе)	Направление волокна	Предел прочности	Предел текучести	Относительное удлинение	Относительное сужение	Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup>
		МПа		%		
		не менее				
0,65–0,85	Продольное	1570	1470	8	45	49,0
	Поперечное	1570	1470	6	40	39,2
0,45–0,65	Продольное	1370	1275	8	50	58,9
	Поперечное	1370	1275	6	45	49,0

Из данных, приведенных в таблице, видно, что у сталей с содержанием титана 0,65–0,85% (по массе) несколько более высокие показатели по пределам прочности и текучести по сравнению со сталью с содержанием титана 0,45–0,65% (по массе).

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 8.2. «Высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие свариваемые стали с высокой вязкостью разрушения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

### Материалы и методы

Значительное влияние на уровень механических свойств мартенситостареющих сталей оказывает их технология изготовления, которая зависит от качества выплавленного металла, температур начала и конца деформации, режимов термообработки и других факторов.

Выплавку исследуемых сталей производили из чистых шихтовых материалов в вакуумно-индукционной печи емкостью 1 т с последующим вакуумно-дуговым переплавом в кристаллизаторе  $\varnothing 320$  мм. Слитки деформировали на прессе в интервале температур 900–1200°C на заготовки и далее прокатали на размеры:  $\varnothing 18$  мм, длина 70 мм. Отбор образцов для испытаний механических свойств производили согласно ГОСТ 7564–97 в продольном направлении волокна.

Для получения высокого уровня прочностных и пластических характеристик сталей системы легирования Fe–Ni–Mo–Ti–Al проводили исследование влияния температуры старения в диапазоне 470–510°C и времени старения в течение 3 и 6 ч на механические свойства.

Испытания на растяжение осуществляли на разрывной машине Р-100 с автоматическим построением диаграммы растяжения по ГОСТ 1497–84. Ударную вязкость образцов определяли методом Шарпи на маятниковом копре ZCB-2000 по ГОСТ 9454–78.

Микроструктуру стали выявляли методом травления шлифов в 2%-ном спиртовом растворе соляной кислоты. Исследование структуры проводили на оптическом металлографическом микроскопе Neophot-21 по ГОСТ 8233–56.

### Результаты и обсуждение

По результатам испытаний при помощи программы Statistica-6 проведена обработка массива данных механических свойств сталей системы легирования Fe–Ni–Mo–Ti–Al, на основании которой построены распределения уровней предела прочности и ударной вязкости в зависимости от параметров старения.

Анализ данных, приведенных на рис. 1, показывает, что с повышением температуры старения средний уровень предела прочности стали с содержанием титана 0,65–0,85% (по массе) несколько снижается, а ударной вязкости – возрастает.

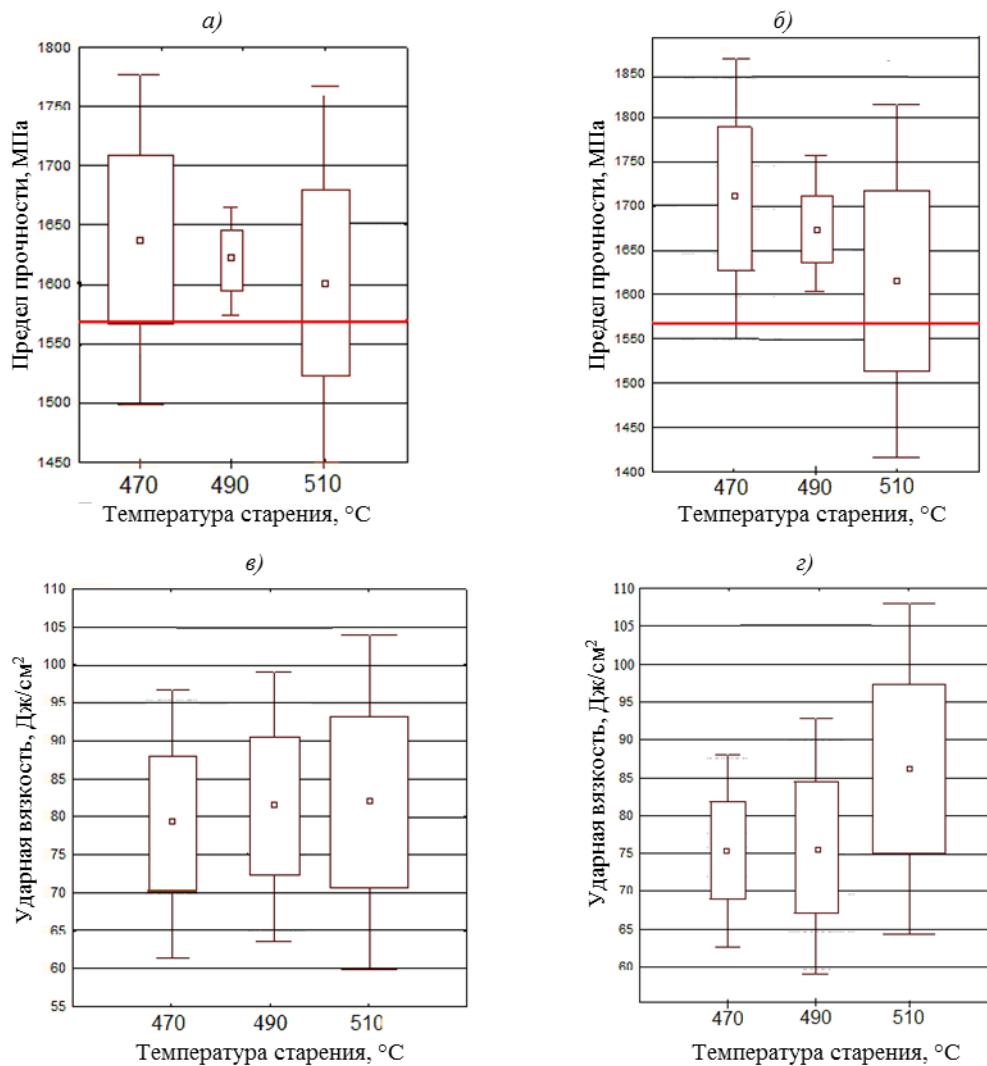


Рис. 1. Упрощенное распределение уровней предела прочности и ударной вязкости стали системы легирования Fe–Ni–Mo–Ti–Al с содержанием титана 0,65–0,85% (по массе) по температурам старения 470, 490 и 510°C в течение 3 (а, в) и 6 ч (б, г)

Для стали с содержанием титана 0,45–0,65% (по массе) при старении образцов наблюдаются несколько иные закономерности по механическим свойствам: при времени

выдержки 3 ч в интервале температур 470–490°C средний уровень ее предела прочности возрастает, а в интервале 490–510°C – снижается. Для ударной вязкости данная зависимость противоположна (рис. 2). При старении в течение 6 ч данные зависимости проявляются менее заметно: средние уровни предела прочности и ударной вязкости при температуре отпуска 470 и 490°C приблизительно одинаковые, однако дальнейшее повышение температуры до 510°C способствует резкому снижению прочностных свойств и повышению уровня ударной вязкости. Предположительно данный факт разупрочнения стали с пониженным содержанием титана можно объяснить коагуляцией интерметаллидной фазы ( $\text{Ni}_3\text{Ti}$ ) в процессе старения, а также обратным превращением мартенсита в аустенит ( $\alpha \rightarrow \gamma$ ) [4, 15].

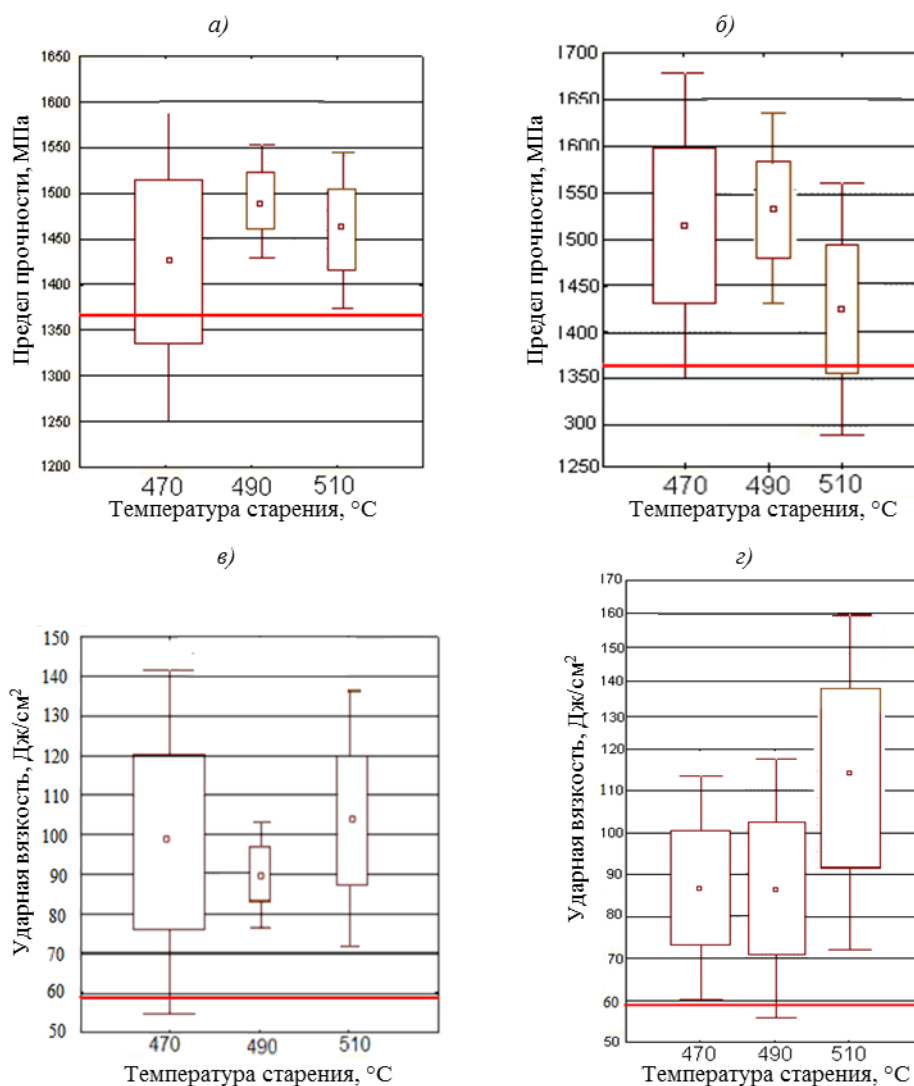


Рис. 2. Упрощенное распределение уровней предела прочности и ударной вязкости стали системы легирования Fe–Ni–Mo–Ti–Al с содержанием титана 0,45–0,65% (по массе) по температурам старения 470, 490 и 510°C в течение 3 (а, в) и 6 ч (б, г)

Однако следует отметить, что общий уровень прочностных свойств стали системы легирования Fe–Ni–Mo–Ti–Al с содержанием титана 0,65–0,85% (по массе) несколько выше, чем стали с пониженным содержанием титана, что, по-видимому, связано

с образованием при старении большего количества мелкодисперсных интерметаллидных фаз типа NiTi ( $Ni_3Ti$ ), обеспечивающих дополнительное упрочнение. Выявленные закономерности влияния температуры старения на уровень механических свойств сталей можно объяснить следующим образом [4]: для стали с содержанием титана 0,65–0,85% (по массе) увеличение температуры старения приводит к коагуляции интерметаллидных фаз, что может способствовать монотонному снижению уровня прочностных свойств, а в стали с содержанием титана 0,45–0,65% (по массе) в температурном интервале 470–490°C происходит сначала их выделение, приводящее к дополнительному росту среднего уровня предела прочности, а в интервале 490–510°C – последующая коагуляция, снижающая прочностные свойства и повышающая характеристики вязкости.

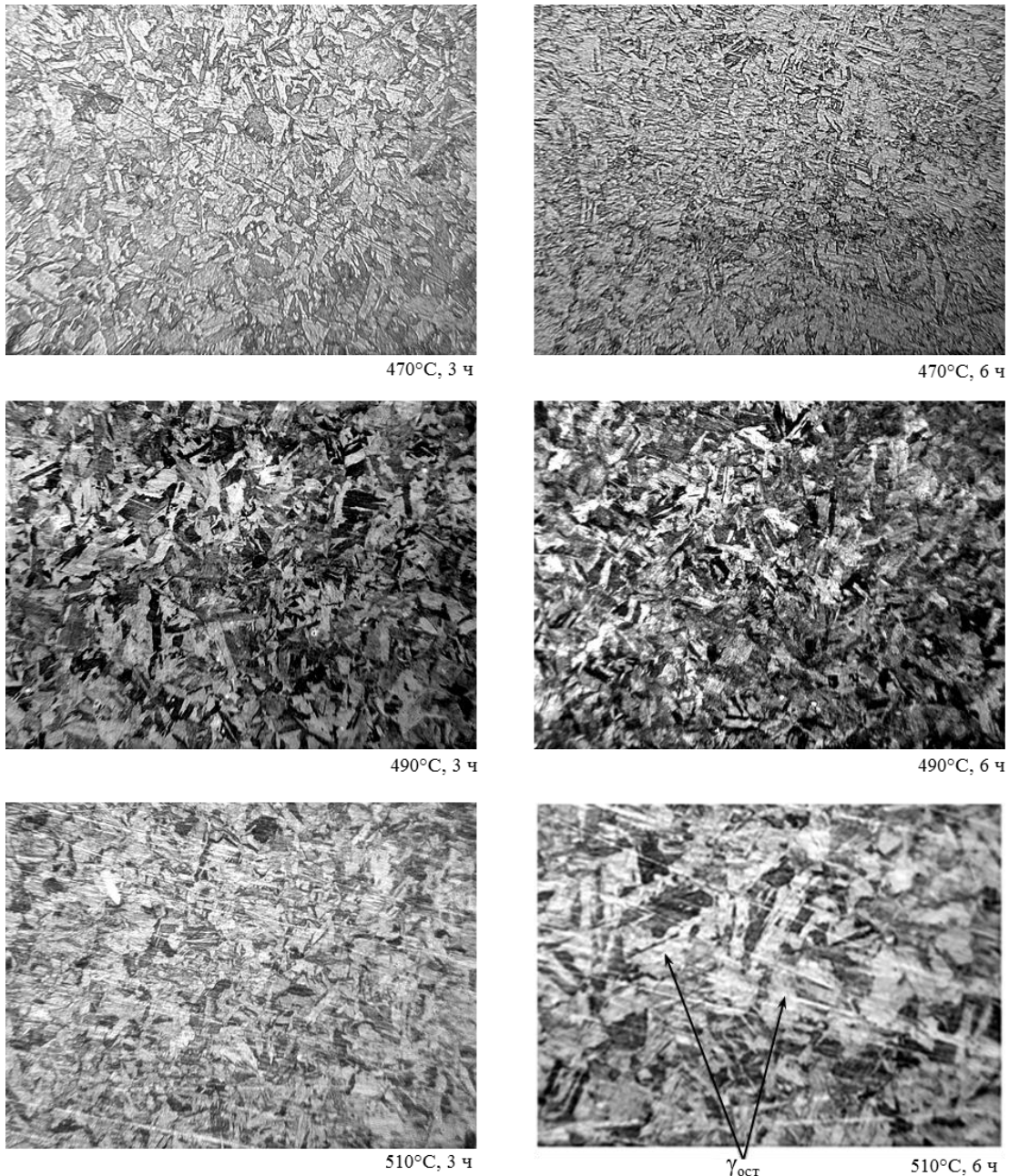


Рис. 3 Микроструктура ( $\times 200$ ) стали системы легирования Fe–Ni–Mo–Ti–Al с содержанием титана 0,65–0,85% (по массе)

Полученные зависимости уровня механических свойств сталей от технологических параметров термообработки хорошо коррелируют с микроструктурой исследуемых сталей – например, стали системы легирования Fe–Ni–Mo–Ti–Al с содержанием титана 0,65–0,85% (по массе). Из данных, приведенных на рис. 3, видно, что при повышении температуры старения до 510°C и увеличении времени старения с 3 до 6 ч наблюдалось появление в структуре стали значительного количества остаточного аустенита ( $\gamma_{\text{ост}}$ ) [4, 11, 15]. В работе [11] также установлено, что помимо  $\gamma_{\text{ост}}$  при данных температурах старения и продолжительной выдержке в мартенситостареющих сталях может формироваться до 15–20% ревертированного аустенита ( $\gamma_{\text{рев}}$ ), что в совокупности способствует некоторому разупрочнению стали с одновременным повышением уровня ударной вязкости, хладостойкости, сопротивления усталости и циклической трещиностойкости.

Анализ влияния времени выдержки стали с содержанием титана 0,65–0,85% (по массе) на ее прочностные свойства показал, что увеличение времени старения при температурах 470 и 490°C способствовало росту уровня предела прочности и снижению уровня ударной вязкости, однако при температуре старения 510°C увеличение времени старения практически не изменяло предел прочности и уровень ударной вязкости стали.

Для стали с содержанием титана в пределах 0,45–0,65% (по массе) также наблюдался рост предела прочности при температурах старения 470 и 490°C при увеличении времени старения с 3 до 6 ч с одновременным снижением уровня ударной вязкости. При температуре старения 510°C в течение 6 ч прочностные свойства стали оказались приблизительно на 40 МПа ниже, чем при старении в течение 3 ч.

Анализ полученных результатов показал, что оптимальная температура старения для сталей системы легирования Fe–Ni–Mo–Ti–Al составляет 490°C при продолжительности старения 6 ч. При данной температуре и продолжительности старения обеспечивается уровень предела прочности и ударной вязкости, удовлетворяющий требованиям ТУ.

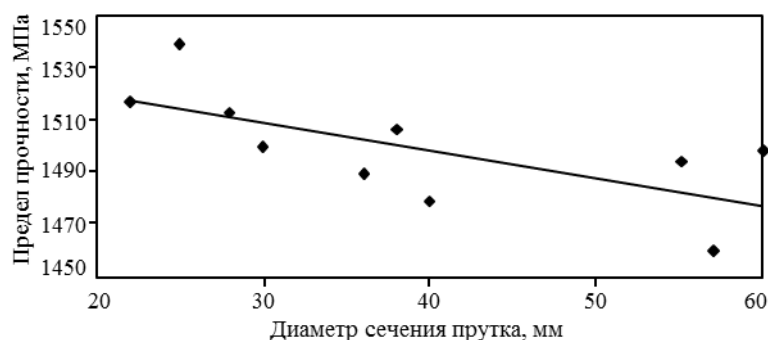


Рис 4. Зависимость механических свойств стали системы легирования Fe–Ni–Mo–Ti–Al с содержанием титана 0,45–0,65% (по массе) от диаметра сечения прутка после отпуска по режиму: 490°C в течение 6 ч, охлаждение на воздухе

Представляет интерес также рассмотреть зависимости уровня механических свойств от диаметра сечения прутков и содержания в них титана. Указанные зависимости построены по среднему уровню предела прочности каждого комплекта образцов с проведением «усредненной» прямой методом интерполяции. Испытания механических свойств проводили после термической обработки образцов по режиму: закалка+старение при 490°C в течение 6 ч, охлаждение на воздухе. Из данных, приведенных на рис. 4, видно, что с увеличением размера поперечного сечения прутков

их предел прочности уменьшается. Это можно объяснить следующим образом: как показано в работе [4], с увеличением размеров сечений изделий в мартенситостареющих сталях наблюдается явление крупнозернистости и разнотерности вследствие более медленного охлаждения в интервале температур 1200–950°C. На поверхности полуфабрикатов большого сечения наблюдается зерно балла 1–2, а в сердцевине – балла 5–6. Помимо этого автором работы [16] для стали аналогичной системы легирования также обнаружены выделения карбидов титана TiC в виде сеток по границам старых аустенитных зерен, а также скопления этих карбидов в виде ликвационной полосчатости, вытянутой в направлении горячей деформации. Последующая закалка на воздухе при более низкой температуре не позволяет полностью растворить зернограницные выделения и измельчить зерно. Совокупность данных факторов может способствовать снижению пластичности и вязкости стали, что и показано на рис. 5. На прутках с меньшей площадью поперечного сечения процесс охлаждения происходит более интенсивно, что препятствует росту зерен и выделению карбидов титана.

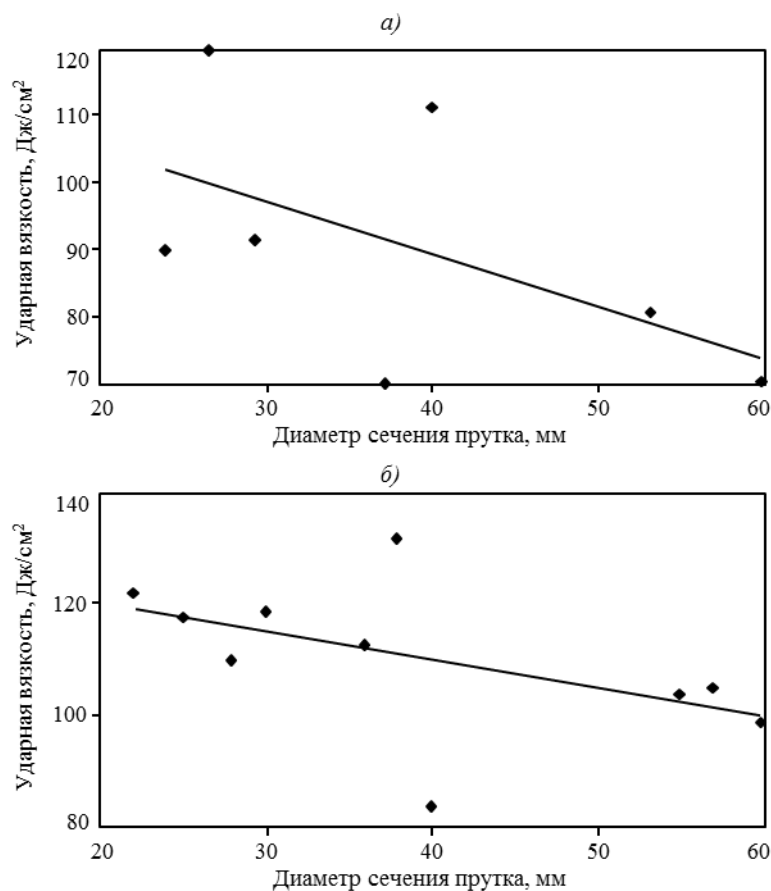


Рис. 5. Зависимость механических свойств стали системы легирования Fe–Ni–Mo–Ti–Al с содержанием титана 0,65–0,85 (а) и 0,45–0,65% (по массе) (б) от диаметра сечения прутка после старения по режиму: закалка+старение при 490°C в течение 6 ч, охлаждение на воздухе

При этом стоит отметить, что для мартенситостареющей стали системы легирования Fe–Ni–Mo–Ti–Al с более низким содержанием титана (0,45–0,65% (по массе)) процесс падения уровня ударной вязкости при одновременном увеличении размера сечения полуфабриката происходит более монотонно, нежели у стали с бóльшим содержанием титана (0,65–0,85% (по массе)). Фактор влияния титана на

механические свойства металла при охлаждении после деформации уменьшается. Его более низкое содержание способствует менее интенсивному процессу связывания углерода в карбиды и их последующего выделения по границам зерен старого аустенитного зерна; при старении происходит лишь выделение из пластичной матрицы мартенсита упрочняющих интерметаллидов типа  $Ni_3Ti$ , равномерно распределенных по всему объему металла. Для стали с повышенным содержанием титана процесс охрупчивания происходит более интенсивно вследствие образования большего количества карбидов при охлаждении, чем для стали с содержанием титана 0,45–0,65% (по массе), что наглядно проиллюстрировано на рис. 5 – зависимость уровня ударной вязкости от диаметра сечения прутка для стали с содержанием титана 0,45–0,65% (по массе) более пологая (по сравнению с зависимостью для стали с содержанием титана 0,65–0,8% (по массе)).

### Заключения

1. Установлено, что значительное влияние на уровень механических свойств мартенситостареющих сталей системы легирования Fe–Ni–Mo–Ti–Al оказывают как параметры термообработки, так и скорость охлаждения прутков после горячей деформации, зависящая главным образом от размера их поперечного сечения и содержания титана.

2. При испытаниях механических свойств образцов сталей системы легирования Fe–Ni–Mo–Ti–Al, термообработанных по режиму: закалка+старение (при 470–510°C в течение 3 и 6 ч), уровень ударной вязкости значительно превышал нормы, указанные в таблице.

3. У обоих марок сталей при температуре старения 510°C наблюдалось значительное снижение прочностных свойств по сравнению с температурами 470 и 490°C. С увеличением продолжительности старения данных сталей их предел прочности возрастает. Для стали с содержанием титана 0,45–0,65% (по массе) при температуре старения 510°C с увеличением времени выдержки с 3 до 6 ч наблюдается незначительное снижение предела прочности.

4. Снижение прочностных свойств сталей при увеличении температуры старения до 510°C, а также времени старения с 3 до 6 ч для стали с содержанием титана 0,45–0,65% (по массе) предположительно связано с коагуляцией интерметаллидной фазы типа  $NiTi$  ( $Ni_3Ti$ ) и образованием значительного количества остаточного аустенита.

5. На основании проведенных исследований установлен оптимальный режим старения для сталей системы легирования Fe–Ni–Mo–Ti–Al: температура старения 490°C, продолжительность старения 6 ч. При данном режиме уровень прочностных характеристик и характеристик вязкости соответствует требованиям ТУ.

6. В сталях указанной системы легирования с увеличением диаметра сечения прутков наблюдалось снижение прочностных свойств с одновременным снижением уровня ударной вязкости, что связано с появлением разнотерности в прутках больших сечений и выделением карбидов по границам зерен старого аустенитного зерна в интервале температур 1200–900°C при замедленном процессе охлаждения с температур деформации.

7. При более низком содержании титана (0,45–0,65% (по массе)) процесс выделения карбидов  $TiC$  происходит менее интенсивно, а при малых размерах сечений прутков он практически отсутствует, что способствует более монотонному снижению уровня ударной вязкости при одновременном увеличении диаметра полуфабриката. Для стали с содержанием титана 0,65–0,85% (по массе) процесс охрупчивания происходит более интенсивно, чем для стали с содержанием титана 0,45–0,65% (по массе), вследствие выделения большего количества карбидов при охлаждении после деформации.

8. С целью снижения вероятности образования карбидных включений в изделиях больших сечений и устранения разнородности стали перед выполнением упрочняющей термообработки (закалка+старение) необходимо произвести процесс растворения (аустенизации) с последующей закалкой в воде или масле. Во избежание образования трещин охлаждение при закалке в воде можно производить только до потемнения полуфабрикатов при температуре  $\sim 650^{\circ}\text{C}$ . [4].

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Стратегические направления развития конструкционных материалов и технологий их переработки для авиационных двигателей настоящего и будущего // *Автоматическая сварка*. 2013. №10. С. 23–32.
3. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №S2. С. 3–10.
4. Потак Я.М. Высокопрочные стали. М.: Металлургия, 1972. 208 с.
5. Маркова Е.С., Покровская Н.Г., Шалькевич А.Б., Громов В.И. Мартенситостареющие стали – новые перспективные материалы для валов ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 81–84.
6. Маркова Е.С., Якушева Н.А., Покровская Н.Г., Шалькевич А.Б. Технологические особенности производства мартенситостареющей стали ВКС-180 // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №7. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.09.2017).
7. Лейбова Н.М., Зотьева А.С., Коган Е.С., Феликсон А.Е. О применении мартенситно-старееющих сталей для деталей металлорежущих станков // *МиТОМ*. 1974. №10. С. 12–15.
8. Арзамасов Б.Н., Ховова О.М., Перкас М.Д. Пути совершенствования свойств мартенситно-старееющих сталей // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2003. №9. С. 43–46.
9. Беляков Л.Н. К вопросу о механизме  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращения в мартенситно-старееющих сталях // *Металлургия: Реферативный журнал*. 1976. №3. С. 17–22.
10. Петраков А.Ф., Шалькевич А.Б. Высокопрочные стали в авиастроении // *Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2002: юбил. науч.-технич. сб.* М.: ВИАМ, 2002. С. 180–191.
11. Вылежнев В.П., Коковьякина С.А., Симонов Ю.Н. Сухих А.А. Повышение характеристик надежности мартенситно-старееющей стали 03Н18К9М5Т путем создания структуры типа «нанотриплекс» // *МиТОМ*. 2010. №11. С. 20–24.
12. Шляпнев А.П., Свистунова Т.В., Лапшина О.Б., Сорокина Н.А. и др. Коррозионностойкие, жаростойкие и высокопрочные стали и сплавы: справочник. М.: Интермет Инжиниринг, 2000. 232 с.
13. Гуляев А.П. *Металловедение*. изд. 5-е перераб. М.: Металлургия, 1978. 648 с.
14. Щербаков А.И., Крылов С.А., Калицев В.А., Игнатов В.А. Разработка технологии выплавки высокопрочной мартенситостареющей стали ВКС-180-ИД (01Н18К9М5Т), микролегированной РЗМ // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №2. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.09.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-4-4.
15. Перкас М.Д., Кардонский В.М. Высокопрочные мартенситно-старееющие стали. М.: Металлургия, 1970. 223 с.
16. Беляков Л.Н. Развитие теории фазовых превращений и разработка способов термической обработки низкоуглеродистых мартенситно-старееющих и нержавеющей азотируемых сталей: дис. ... д-р техн. наук. М., 1981. 400 с.