

Научная статья

УДК 669.15

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-11-20

ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОЙ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ АВТОМАТНОЙ СТАЛИ

А.В. Леонов¹, Н.М. Вознесенская¹, Е.И. Ульянов¹, Н.А. Якушева¹, Э.А. Елисеев¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Рассмотрены основные виды применяемых в настоящее время автоматных сталей с улучшенной обрабатываемостью резанием, включая коррозионностойкие автоматные стали. Разработан химический состав коррозионностойкой автоматной стали. Исследовано влияние различных температур закалки и отпуска на микроструктуру и свойства коррозионностойкой автоматной стали. Показаны результаты по механообрабатываемости стали с подобранными химическим составом и режимом термической обработки, обеспечивающими повышение скорости резания и стойкости инструмента.

Ключевые слова: автоматная сталь, обрабатываемость резанием, закалка, термообработка, микроструктура, твердость

Для цитирования: Леонов А.В., Вознесенская Н.М., Ульянов Е.И., Якушева Н.А., Елисеев Э.А. Исследование новой коррозионностойкой автоматной стали // Труды ВИАМ. 2026. № 4 (158). С. 11–20. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-11-20.

Scientific article

INVESTIGATION OF A NEW CORROSION-RESISTANT FREE-MACHINING STEEL

A. V. Leonov¹, N. M. Voznesenskaya¹, E. I. Ulyanov¹, N. A. Yakusheva¹, E. A. Eliseev¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The main types of currently used free-machining steels, including corrosion-resistance free-machining steels, are observed. The chemical composition of corrosion-resistant free-cutting steel has been developed. The influence of various quenching and tempering temperatures on the microstructure and properties of corrosion-resistant free-cutting steel has been investigated. The results on the machinability of steel with the selected chemical composition and its heat treatment mode, ensuring an increase in cutting speed and tool life, are presented.

Keywords: free-machining steel, machinability, quenching, heat treatment, microstructure, hardness

For citation: Leonov A. V., Voznesenskaya N. M., Ulyanov E. I., Yakusheva N. A., Eliseev E. A. Investigation of a new corrosion-resistant free-machining steel. *Trudy VIAM*, 2026, no. 4 (158), pp. 11–20. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-11-20.

Введение

В современном точном машиностроении непрерывно повышаются требования к разрабатываемым изделиям. В такой высокотехнологичной области производства проектирование и изготовление деталей и компонентов с исключительно высокими допусками микронного уровня точности требуют применения специальных материалов с улучшенной обрабатываемостью резанием [1, 2].

Обрабатываемость резанием оценивается по нескольким показателям, основным из которых является интенсивность изнашивания режущего инструмента. Количественной характеристикой интенсивности изнашивания инструмента считается максимально допустимая скорость резания, которая соответствует определенной степени износа или заданной стойкости инструмента [3].

Обрабатываемость материала зависит от его механических свойств, микроструктуры и химического состава [4, 5].

Допустимая скорость резания уменьшается при повышении твердости и прочности стали за счет возрастающих усилий резания и температуры нагрева инструмента, вызывающего разупрочнение его режущей кромки и снижение стойкости. При этом обрабатываемость слишком пластичных сталей, в частности сталей аустенитного класса, затруднена в связи с образованием сплошной трудноломающейся стружки, которая оказывает негативное влияние на изнашиваемость инструмента и в итоге приводит к получению шероховатой поверхности детали с задирами.

Так, за рубежом широкое применение при изготовлении деталей изделий специального назначения нашли углеродистые легированные хромоникелевые и хромомolibденовые стали марок 4140 и 4150 с содержанием углерода 0,4 и 0,5 % (здесь и далее – % (по массе)), а также ~1 % Cr и 0,25 % Mo соответственно [6, 7].

В России для подобных изделий традиционно применяют отечественные углеродистые легированные стали марок 30ХН2МФА, 30ХРА, 30ХМА и 38ХМА. Указанные стали обладают высокими прочностными характеристиками, удовлетворительной обрабатываемостью резанием и используются для массового серийного производства благодаря оптимальному соотношению между ценой и качеством [8]. Однако эти стали являются некоррозионностойкими. Так, в условиях полевого применения детали из сталей подобного состава испытывают воздействие таких природных факторов, как повышенная влажность, пылевое (абразивное) загрязнение, солевая коррозия и др., что негативно влияет на их работоспособность и долговечность [9].

При изготовлении деталей специального назначения, требующих высокой точности, широкое распространение получили автоматные стали, содержащие повышенное количество серы [10, 11].

Легирование стали серой в количестве ~0,3 % вызывает в микроструктуре местные нарушения сплошности металлической матрицы благодаря тонкому распределению сульфидных включений – сульфидов марганца MnS, вытянутых вдоль направления волокна при деформации. Сульфиды при обработке оказывают на режущий инструмент смазывающее действие. Присутствие в стали большого количества сульфидов марганца способствует облегчению отделения и измельчению стружки. При этом одновременно устраняются налипание и намазывание металла на поверхности, наблюдаемые при обработке мягких пластичных материалов, что способствует получению гладкой блестящей поверхности резания [12, 13].

Для улучшения обрабатываемости резанием, помимо серы, в состав стали добавляют такие элементы, как фосфор, свинец, висмут и кальций [14–16].

Добавление фосфора в небольшом количестве (до 0,06–0,12 %) в сочетании с серой способствует улучшению ломкости стружки и облегчает ее удаление [17].

Отечественные углеродистые автоматные стали типа А11 и А20 с повышенным содержанием S (до 0,3 %) и P (до 0,06 %) применяют для изготовления малонагруженных деталей сложной формы, где требуются высокая точность размеров и чистота поверхности, однако отсутствие хрома и, как следствие, низкая коррозионная стойкость ограничивают их применение для производства ответственных деталей [18].

В отечественной промышленности разработаны хромистые автоматные стали марок 3Х13Н2 (ЭИ474), 4Х18Н2М (ЭП378), Х16Н3МАД (ЭП811, ВНС-21) [19].

При изготовлении полуфабрикатов из стали марки ЭИ474 (0,2–0,3 % С и 0,15–0,25 % S) заготовки не склонны к образованию трещин в процессе горячей деформации [20]. Детали из указанной стали после полирования и пассивирования для повышения коррозионностойкости в атмосферных условиях обладают высоким уровнем прочности: после термической обработки обеспечивается твердость ≥ 48 HRC. В основном сталь применяется для изготовления различных типов шестерней, цапф и переходных осей приборов, которые требуют хорошей обрабатываемости резанием и высокой коррозионной стойкости.

Недостатком стали марки ЭИ474 является невозможность эксплуатации деталей при отрицательных температурах (температурный интервал применения составляет 50–150 °С) [20]. Кроме того, при получении требуемой твердости указанной стали (на уровне 27–31 HRC), используемой для изготовления изделий специального назначения, отечественные производители столкнулись со склонностью к хрупкому разрушению и образованию трещин при механической обработке (дорнировании).

Хромистая сталь 4X18H2M (ЭП378) с содержанием 0,35–0,45 % С и 0,15–0,25 % S применяется для изготовления деталей передаточных механизмов приборов (шестерней, цапф, переходных осей и др.), предназначенных для работ в тропических условиях. Температура эксплуатации стали от –50 до +150 °С. Упрочняющая термическая обработка стали обеспечивает твердость 48–52 HRC, предел прочности 1620 МПа и предел текучести 1325 МПа.

Однако низкая ударная вязкость KCU (19 Дж/см²) в термически упрочненном состоянии и высокое содержание углерода (0,35–0,45 %), который не обеспечивает достаточной коррозионной стойкости из-за присутствия карбидов хрома в микроструктуре, ограничивают область применения стали ЭП378 для изготовления деталей специального назначения.

Сталь переходного класса X16H3MAD (ЭП811, ВНС-21) является модификацией широко распространенной и применяемой в деталях авиационной техники стали марки ВНС-5 (ЭП310) с добавлением серы в количестве 0,07–0,15 %. Детали, изготовленные из стали ВНС-21, предназначены для работы в тропических условиях, интервал температур эксплуатации стали от –50 до +150 °С. Детали применяются для получения таких компонентов механизмов передаточных приборов, как оси и трибки (мелкомодульные зубчатые колеса с малым количеством зубьев, составляющие одно целое со своей осью вращения). Однако указанная сталь не нашла широкого распространения в отечественной промышленности из-за сложности ее изготовления в части получения слитков, а именно из-за необходимости контроля фазового состава и доводки его в процессе выплавки до требуемых значений, а также использования специального оборудования.

За рубежом для высокоточных деталей изделий специального назначения широко применяются автоматная коррозионностойкая сталь мартенситного класса марки 416 и ее модификация 416R (США). Буква R (от англ. *rifle* – нарезной) указывает на повышенную обрабатываемость стали (*free machining*). Сталь содержит ~0,1 % С. Наличие в стали серы в количестве ~(0,2–0,3) % в виде легирующего элемента обеспечивает хорошую технологичность при обработке резанием и позволяет достигать высокого качества отделки поверхности при изготовлении деталей. Высокая коррозионная стойкость стали обеспечивается за счет содержания ~(11–13) % Cr и относительно небольшого количества углерода (~0,1 %).

Специалисты НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ провели исследования по разработке автоматной коррозионностойкой стали с механическими свойствами, близкими к показателям стали 416R (патент на изобретение № 2838608) [21].

Повышенное содержание фосфора в разработанной стали по сравнению с его количеством в стали 416R при сохранении концентрации серы способствует получению короткой хрупкой стружки и уменьшению трения между инструментом и обрабатываемой деталью и, как следствие, повышению скорости резания и уменьшению износа инструмента.

В данной работе исследовали особенности изменения механических свойств и микроструктуры после закалки и отпуска при различных температурах, а также влияние разного содержания основных химических элементов на твердость, микроструктуру и обрабатываемость стали.

Материалы и методы

Объектом исследования были прутки $\varnothing 37$ мм из коррозионностойкой автоматной стали разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Выплавку слитков проводили в вакуумно-индукционной печи.

Деформацию слитков для получения заготовок проводили на изотермическом прессе с усилием $16 \cdot 10^6$ Н с последующей прокаткой на пруток $\varnothing 37$ мм на стане радиально-сдвиговой прокатки.

Термическую обработку образцов проводили в атмосферных электропечах.

Исследования микроструктуры образцов в процессе изготовления (слиток–заготовка–пруток) проводили на оптическом инвертированном микроскопе при увеличении $\times 500$.

Твердость образцов определяли на универсальном твердомере методом Роквелла по ГОСТ 9013–59 и методом Бринелля в соответствии с ГОСТ 9012–59.

Испытания на растяжение для определения механических свойств (σ_b , $\sigma_{0,2}$, δ) стали после термической обработки проводили на круглых образцах, вырезанных из прутков, в соответствии с ГОСТ 1497–2023.

Определение углерода и серы проводили с использованием газоанализатора. Содержание остальных элементов определяли атомно-эмиссионным методом с помощью спектрометра.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Для исследования микроструктуры и свойств автоматной стали выплавлены плавки с различным химическим составом. За базовый принят следующий состав стали (плавка 1), % [21]:

C	Cr	Ni	Mn	S	P
0,13	12,5	0,25	0,9	0,3	0,10

Химический состав остальных трех плавки относительно плавки 1 имел следующие отличия:

- в плавке 2 было пониженное содержание углерода и марганца без легирования фосфором;
- плавка 3 легирована повышенным количеством никеля при пониженном уровне марганца и без добавления фосфора;
- плавка 4 имеет пониженное содержание углерода и марганца с добавлением фосфора.

Легирование фосфором способствует получению короткой хрупкой стружки, уменьшению трения между инструментом и деталью и, как следствие, повышению скорости резанья, уменьшению износа инструмента.

Выплавку стали проводили в вакуумно-индукционной печи с разливкой в слитки массой 35 кг. Разлив в слитки осуществлялся медленно для уменьшения ликвационной неоднородности. Слитки подвергали гомогенизации для выравнивания химического состава и отжигу под последующую механическую обработку. Слитки сначала ковали до получения $\varnothing 70$ мм, а затем прокатывали до $\varnothing(37–38)$ мм.

После окончательной термической обработки прутки подвергали исследованию механических свойств и обработке резанием с помощью сверления. Исследовали микроструктуру на различных стадиях изготовления прутка $\varnothing(37-38)$ мм.

Микроструктуры слитка и прутков из плавки 3 представлены на рис. 1–3. На микрошлифе (рис. 1) без травления в литом состоянии видны сульфиды марганца по границам дендритов.

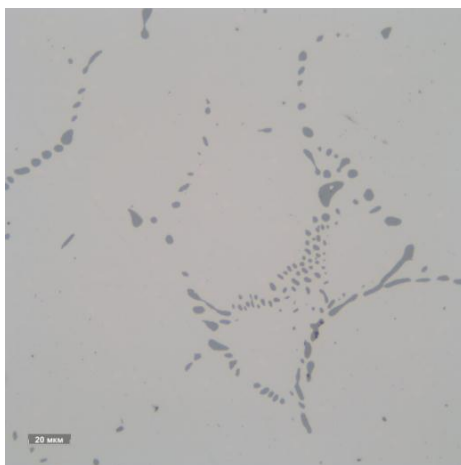


Рис. 1. Микроструктура ($\times 500$, продольное направление) слитка (без травления)

Микроструктура микрошлифа (рис. 2) кованого прутка $\varnothing 70$ мм после электролитического травления в 10%-ном растворе щавелевой кислоты представляет собой сульфиды по границам дендритов, δ -феррит и плохо травящийся мартенсит. Такая микроструктура свидетельствует о малой степени деформации (укова).

Микроструктура прутка $\varnothing 37$ мм (рис. 3) после прокатки и термообработки состоит из сульфидов марганца, вытянутых вдоль направления прокатки, δ -феррита и мартенсита.

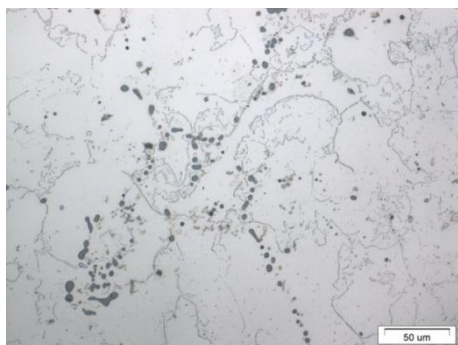


Рис. 2. Микроструктура ($\times 500$, продольное направление) прутка $\varnothing 70$ мм послековки и отжига (травление электролитическое)

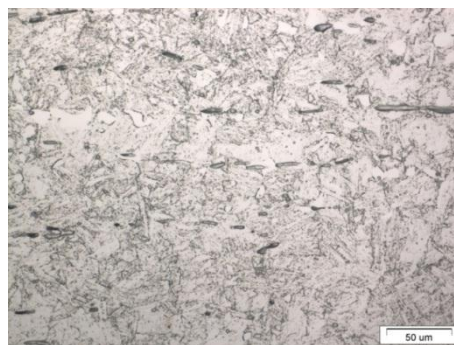


Рис. 3. Микроструктура ($\times 500$, продольное направление) прутка $\varnothing 37$ мм после прокатки и термообработки (закалка + отпуск)

В связи с тем, что, кроме хрома, сера и фосфор также являются ферритообразующими элементами, в микроструктуре стали содержится высокотемпературная фаза δ -феррит.

Исследование прутков $\varnothing 37$ мм из плавки с пониженным содержанием углерода ($\sim 0,10$ %) и марганца ($\sim 0,4$ %) при содержании серы 0,3 % показало присутствие в микроструктуре повышенного количества δ -феррита (рис. 4), что привело к появлению трещин при горячей деформации.

Легирование стали аустенитообразующими элементами – углеродом (~0,13 %) и марганцем (~0,9 %) при содержании серы 0,3 % вызывает уменьшение содержания δ -феррита в микроструктуре стали (рис. 5) и приводит к отсутствию трещин при горячей деформации.

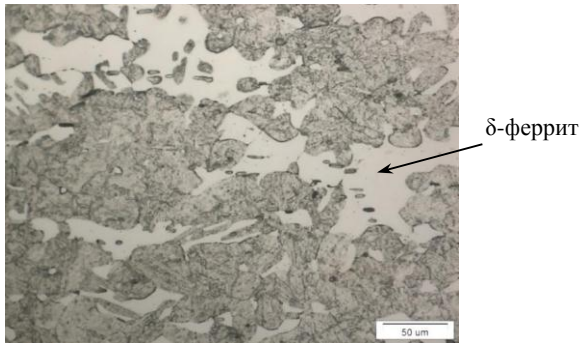


Рис. 4. δ -феррит в микроструктуре ($\times 500$, продольное направление) прутка $\varnothing 37$ мм из стали с низким содержанием углерода и марганца после закалки и отпуска

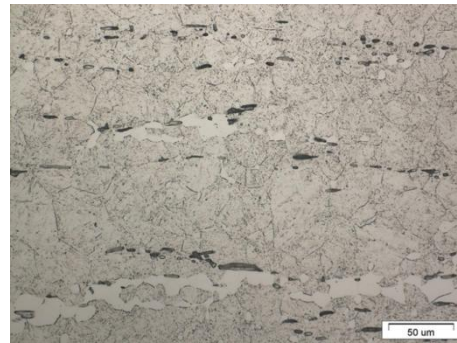


Рис. 5. Микроструктура ($\times 500$, продольное направление) прутка $\varnothing 37$ мм из стали с содержанием углерода 0,13 %, марганца 0,9 % и серы 0,3 % после закалки и отпуска (сульфиды марганца, δ -феррит, мартенсит)

Для выбора режима упрочняющей термической обработки для деталей из автоматной стали проведены исследования влияния различных режимов термообработки на стандартные механические свойства и твердость плавок 1–4 с различным химическим составом.

Исследованы различные режимы закалки и отпуска. Исследования проводили на шайбах толщиной ~15 мм из прутков $\varnothing 37$ мм. Закалку проводили по режимам P1 (при температуре, достаточной для растворения частиц карбидов) и P2 (при температуре на 20 °C больше, чем температура P1).

Из источников научно-технической литературы известно, что для получения твердости импортной автоматной стали 416R на уровне ~30 HRC отпуск проводится в интервале температур ~(500–600) °C, в связи с чем выбраны различные температуры отпуска (O1, O2, O3), находящиеся в указанном интервале, при этом O3 > O2 > O1. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Твердость опытных плавок (шайбы $\varnothing 37$ мм и толщиной 15 мм)

Условный номер плавки	Режим термообработки, °C		Твердость			
			HВ		HRC	
	закалка	отпуск	центр шайбы		край шайбы	
3	P1	–	420–422	42,0–42,5	420–425	42–43
		O1	360–370	37,0–37,5	370	37,5
		O2	295–300	30–31	300	29–30
	O3	290–295	29–30	295	29	
	P2	O3	290–295	29–30	295	28–29
2	P2	O3	240–250	26–27	250–255	27–28
4			240–250	26–27	250–255	27–28
1			260–270	29–31	260–270	29–30
Сталь 416R	980–1000	540	278–285	30–31	290–295	28–29
	Согласно данным работы [22]		290	30	–	–

Результаты исследований показали, что твердость образцов из опытных плавок 1 и 3 соответствует значениям импортной стали 416R после закалки с обеих температур и отпуска по режимам O2 и O3. Механические свойства плавок с различным содержанием углерода представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Механические свойства образцов из плавков (прутки Ø37 мм)
с различным содержанием углерода**

Условный номер плавки	σ_b	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$
	МПа		
4	860	760	16
1	960	830	15
Сталь 416R	890–1035	760–895	≥ 16

После закалки и отпуска твердость стали повышается до 29–31 HRC за счет образования мартенситной микроструктуры с содержанием углерода 0,12–0,15 % при выбранном соотношении других химических элементов (Mn и Ni).

Пониженное содержание углерода и марганца в плавках 2 и 4 не обеспечивает требуемую твердость, значение показателя составило 26–27 HRC.

За счет заданного соотношения элементов и повышенного содержания фосфора автоматная сталь обладает улучшенными характеристиками механообрабатываемости (скорость и подача инструмента в процессе резания), что позволяет повысить производительность и точность изготовления деталей по сравнению с традиционно применяемыми автоматными коррозионностойкими сталями.

Повышенное содержание никеля (~0,8 %) в плавке 3 привело к увеличению пластичности стали, в результате чего образовалась несплошность и произошла остановка инструмента в процессе дорнирования заготовки (рис. 6).

Снижение содержания никеля до 0,25 % и дополнительное легирование фосфором до 0,10 % в плавке 1 позволили (рис. 7) повысить скорость резания (до ≥ 40 м/мин) и стойкость инструмента, а также способствовали получению поверхности лучшего качества.

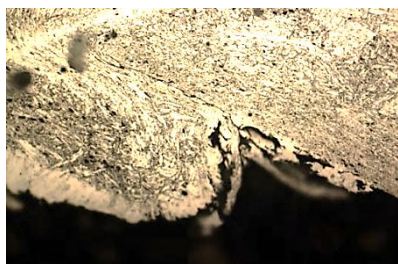


Рис. 6. Несплошность при дорнировании прутка из плавки 3 с содержанием никеля ~0,8 % ($\times 500$)



Рис. 7. Сечение прутка из плавки 1 с содержанием никеля 0,25 % и фосфора до 0,10 % после дорнирования ($\times 500$)

Результаты исследования механообрабатываемости плавки 1 представлены в табл. 3 [21].

Таблица 3

Исследованные режимы резания (максимальные значения)

Глубина, дюйм (мм)	Скорость, фут/мин (м/мин)	Подача, дюйм/об (мм/об)	Скорость, фут/мин (м/мин)	Подача, дюйм/об (мм/об)	Квоты превосходства по сравнению с прототипом, %	
	сталь 416R		разработанная сталь		скорость	подача
0,50 (12,7)	30–115 (9,1–35,0)	0,005–0,009 (0,127–0,228)	131 (40)	0,012 (0,37)	14	33
0,75 (19,0)		0,008–0,012 (0,203–0,305)	131 (40)	0,015 (0,37)		

Заключения

Подобран оптимальный химический состав автоматной коррозионностойкой стали, содержащей повышенное количество серы и фосфора. Получен патент на изобретение [21].

Исследованы механические свойства, в том числе твердость, плавок с различным химическим составом после разных режимов термической обработки.

Требуемые механические свойства и хорошую технологическую пластичность при горячей деформации обеспечивают плавки с содержанием углерода $\geq 0,12$ %, марганца $\sim 0,9$ % и никеля $\sim 0,25$ %.

Показано, что после закалки и высокого отпуска сталь имеет требуемую твердость (28–31 HRC).

Подобранные химический состав стали и режим упрочняющей термической обработки позволили повысить скорость резания (до ≥ 40 м/мин), стойкость инструмента и получить поверхность лучшего качества.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916.
2. Яковлев Н.О., Селиванов А.А., Гулина И.В., Гриневич А.В. К вопросу о долговечности шарнирно-болтовых соединений // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4 (61). С. 79–85. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-79-85.
3. Севальнев Г.С., Севальнева Т.Г., Колмаков А.Г., Дульнев К.В., Крылов С.А. Исследование триботехнических характеристик коррозионностойких сталей с различным механизмом объемного упрочнения // Труды ВИАМ. 2021. № 10 (104). С. 3–11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-3-11.
4. Елисеев Э.А., Севальнев Г.С., Дорошенко А.В., Дружинина М.Э. Влияние температурно-временных параметров длительных выдержек на превращения в конструкционных сталях (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 2 (63). С. 15–23. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 18.09.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-15-23.
5. Муратов В.С., Сахаров В.В. Особенности микроструктуры и свариваемость нержавеющей сталей с улучшенной обрабатываемостью резанием // Успехи современного естествознания. 2005. № 11. С. 31–32.
6. Meysami A.H., Ghasemzadeh R., Seyedein S.H., Aboutalebi M.R. An investigation on the microstructure and mechanical properties of direct-quenched and tempered AISI 4140 steel // Materials & Design. 2010. Vol. 31 (3). P. 1570–1575.
7. Soni A., Kunaraswamy A., Praveen K.V. Microstructural and tribomechanical characterization of NiB coated 4150 steel // Journal of Materials Engineering and Performance. 2025. Vol. 34 (2). P. 1353–1363.
8. Яшин Ю.Д., Солдаткин С.А., Тихонов А.К. Стали улучшенной обрабатываемости резанием // Черная металлургия. 2010. № 10. С. 50–54.
9. Шитиков В.С., Кодак Н.П. К возможности оценки степени коррозионных поражений вихретоковым методом контроля // Труды ВИАМ. 2021. № 5 (99). С. 96–104. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-96-104.
10. Муратов В.С., Сахаров В.В. Улучшение обрабатываемости резанием нержавеющей сталей // Успехи современного естествознания. 2005. № 7. С. 73–75.
11. Святкин А.В., Солдаткин С.А., Болдырев Д.А. Влияние уровня раскисления на свойства автоматных сталей с высокой обрабатываемостью резанием // Сталь. 2020. № 11. С. 27–32.
12. Рябов А.В. Технологические аспекты производства бессвинцовистых экологически чистых легкообрабатываемых сталей // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер.: Металлургия. 2015. № 15 (3). С. 90–94.

13. Житенев А.И., Ровбо А.С., Нечаев Д.В., Рябошук С.В. Поведение висмута и сульфида марганца в автоматной стали // *Черные металлы*. 2024. № 2. С. 46–52.
14. Авиационные материалы: справочник в 9 т. / под общ. ред. А.Т. Туманова. Изд. 6-е, перераб. и доп. М.: ОНТИ, 1975. Т. 2: Коррозионностойкие и жаростойкие стали и сплавы / под ред. Н.М. Склярова, М.Ф. Алексеенко. 372 с.
15. Арзамасов Б.Н. *Материаловедение: учеб. для вузов* М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 648 с.
16. Гудремон Э. *Специальные стали: пер. с нем.* Изд. 2-е. М.: Металлургия, 1966. 1274 с.
17. Кожухов А.А., Семин А.Е. Основные направления разработки технологии производства автоматных марок стали, не содержащих свинца // Сб. тр. конф. «Физико-химические основы металлургических процессов». Выкса, 2022. С. 165–170.
18. Кунакбаева А.Т., Столяров А.М., Потапова М.В. Усвоение серы при ковшевой обработке автоматной стали // *Теория и технология металлургического производства*. 2021. № 1 (36). С. 11–14.
19. Воротынцев Д.Д. Современные инструментальные материалы // *Мат. XIII Междунар. форума «Образование. Наука. Производство»*. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021. С. 938–942.
20. Фоминов Е.В., Тороп Ю.Ф., Алиев М.М. Технология повышения качества мелкогабаритных отверстий твердосплавными развертками // *Современные материалы, техника и технологии*. 2021. № 1 (34). С. 76–79.
21. Коррозионно-стойкая автоматная сталь: пат. 2838608 Рос. Федерация; заявл. 12.11.24; опубл. 21.04.25.
22. Bannykh O.A., Sorokin A.M., Bannykha I.O., Lukin E.I. Structure and Mechanical Properties of High-Strength Structural Steels // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2018. No. 6. P. 528–532.

References

1. Kablov E.N., Antipov V.V. The role of new generation materials in ensuring technological sovereignty. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916.
2. Iakovlev N.O., Selivanov A.A., Gulina I.V., Grinevich A.V. Revisiting the durability of hinged-bolt connections. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 79–85. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-79-85.
3. Sevalnev G.S., Sevalneva T.G., Kolmakov A.G., Dulnev K.V., Krylov S.A. Study of the tribotechnical characteristics of corrosion-resistant steels with different mechanisms of volumetric hardening. *Trudy VIAM*, 2021, no. 10 (104), pp. 3–11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 18, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-3-11.
4. Eliseev E.A., Sevalnev G.S., Doroshenko A.V., Druzhinina M.E. Influence of time-temperature parameters of long-duration exposure on transformations in structural steels (review). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), pp. 15–23. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 18, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-15-23.
5. Muratov V.S., Sakharov V.V. Features of the microstructure and weldability of stainless steels with improved machinability. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2005, no. 11, pp. 31–32.
6. Meysami A.H., Ghasemzadeh R., Seyedein S.H., Aboutalebi M.R. An investigation on the microstructure and mechanical properties of direct-quenched and tempered AISI 4140 steel. *Materials & Design*, 2010, vol. 31 (3), pp. 1570–1575.
7. Soni A., Kunarawamy A., Praveen K.B. Microstructural and tribomechanical characterization of NiB coated 4150 steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2025, vol. 34 (2), pp. 1353–1363.
8. Yashin Yu.D., Soldatkin S.A., Tikhonov A.K. Steels with improved machinability. *Chernaya metallurgiya*, 2010, no. 10, pp. 50–54.
9. Shitikov V.S., Kodak N.P. The ability to assess the degree of corrosion damage by eddy current testing. *Trudy VIAM*, 2021, no. 5 (99), pp. 96–104. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 18, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-96-104.
10. Muratov V.S., Sakharov V.V. Improving the Machinability of Stainless Steels. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*, 2005, no. 7, pp. 73–75.

11. Svyatkin A.V., Soldatkin S.A., Boldyrev D.A. Influence of Deoxidation Level on the Properties of Free-Machining Steels with High Machinability. *Stal*, 2020, no. 11, pp. 27–32.
12. Ryabov A.V. Technological Aspects of the Production of Lead-Free, Environmentally Friendly, Free-Machining Steels. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Metallurgiya*, 2015, no. 15 (3), pp. 90–94.
13. Zhitenev A.I., Rovbo A.S., Nechaev D.V., Ryaboshuk S.V. Behavior of bismuth and manganese sulfide in free-cutting steel. *Chernye metally*, 2024, no. 2, pp. 46–52.
14. *Aviation materials: a handbook in 9 vols.* Ed. A.T. Tumanov. 6th ed., rev. and ad. Moscow: ONTI, 1975, vol. 2: Corrosion-resistant and heat-resistant steels and alloys. Ed. N.M. Sklyarov, M.F. Alekseenko, 372 p.
15. Arzamasov B.N. *Materials Science: a textbook for universities.* Moscow: Publ. house of Bauman Moscow State Technical Univ., 2002, 648 p.
16. Gudremon E. *Special steels: trans. from Germ.* 2nd ed. Moscow: Metallurgiya, 1966, 1274 p.
17. Kozhukhov A.A., Semin A.E. Main directions of development of production technology for lead-free free-cutting steel grades. *Coll. conf. «Physicochemical foundations of metallurgical processes»*. Vyksa, 2022, pp. 165–170.
18. Kunakbaeva A.T., Stolyarov A.M., Potapova M.V. Sulfur absorption during ladle processing of free-cutting steel. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*, 2021, no. 1 (36), pp. 11–14.
19. Vorotyntsev D.D. Modern tool materials. *Proc. XIII International forum «Education. Science. Production»*. Belgorod: BSTU named after V.G. Shukhov, 2021, pp. 938–942.
20. Fominov E.V., Torop Yu.F., Aliev M.M. Technology for Improving the Quality of Small-Sized Holes with Carbide Reamers. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii*, 2021, no. 1 (34), pp. 76–79.
21. *Corrosion-Resistant Free-Machining Steel*: pat. 2838608 Rus. Federation; appl. 12.11.24; publ. 21.04.25.
22. Bannykh O.A., Sorokin A.M., Bannykha I.O., Lukin E.I. Structure and Mechanical Properties of High-Strength Structural Steels. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2018, no. 6, pp. 528–532.

Информация об авторах

Леонов Александр Владимирович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Вознесенская Наталья Михайловна, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ульянов Егор Ильич, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Якушева Наталья Александровна, заместитель начальника Научно-исследовательского отделения, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Елисеев Эдуард Анатольевич, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Alexander V. Leonov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Natalya M. Voznesenskaya, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Egor I. Ulyanov, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Natalya A. Yakusheva, Deputy Head of Scientific-Research Bureau, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Eduard A. Eliseev, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 30.09.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 30.10.2025.

The article was submitted 30.09.2025; approved and accepted for publication after reviewing 30.10.2025