

УДК 621.771.65

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА РЕЛЬСОВЫХ СТАЛЕЙ НА ИХ ПЛАСТИЧНОСТЬ

А.А. Уманский¹, А.В. Головатенко², А.С. Симачев¹

E-mail: umanskii@bk.ru

¹Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

²АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»,
Новокузнецк, Россия

Аннотация. На основании проведенных экспериментальных исследований определены закономерности влияния химического состава рельсовых сталей марок Э76ХФ и Э90ХАФ на их максимальную пластичность. Получены данные о значимом влиянии увеличения содержания углерода, азота, ванадия, серы и фосфора в указанных сталях в рамках интервала (согласно ГОСТ) на уменьшение их пластичности. Показано значимое влияние повышения скорости деформации рассматриваемых сталей на снижение их горячей пластичности.

Ключевые слова: рельсовые стали, скорость деформации, горячая пластичность, грузонапряженность, дифференцированно-термоупрочненные рельсы.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION OF RAIL STEELS ON ITS PLASTICITY

A.A. Umanskii¹, A.V. Golovatenko², A.S. Simachev¹

E-mail: umanskii@bk.ru

¹Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

²EVRAZ Consolidated West Siberian Metallurgical Plant JSC, Novokuznetsk, Russia

Abstract. Based on experimental research, regularities of influence of chemical composition of E76KHF and E90KHAФ rail steel on its maximum plasticity are defined. Data on significant effect of increasing content of carbon, nitrogen, vanadium, sulfur and phosphorus in these steel grades within the interval specified in the state standard on reduction of their plasticity are obtained. Significant effect of increase in steels deformation rate on reduction of their hot plasticity is shown.

Keywords: rail steels, deformation rate, hot plasticity, traffic load capacity, heat-strengthened rails.

В последние годы отмечается значительное усложнение условий эксплуатации железнодорожных путей, связанное, прежде всего, с повышением грузонапряженности (рис. 1). Данный факт обуславливает необходимость внедрения и расширения использования железнодорожных рельсов, обладающих повышенными эксплуатационными свойствами.

Высокие эксплуатационные характеристики рельсов достигаются за счет совместного действия двух технологических решений: использования новых режимов термообработки и изменения химического состава рельсовой стали. В

настоящее время для массового производства дифференцированно-термоупрочненных рельсов общего назначения (категория ДТ350) используется сталь 76ХФ, ранее термоупрочненные рельсы (категории Т1 и Т2) производились из стали 76Ф. На наиболее сложные участки железнодорожного пути (с малым радиусом кривизны, в суровых климатических условиях) укладываются рельсы категории ДТ370ИК (дифференцированно-термоупрочненные с прокатного нагрева повышенной износостойкости и контактной выносливости), произведенные из стали 90ХАФ. В перспективе на таких участках

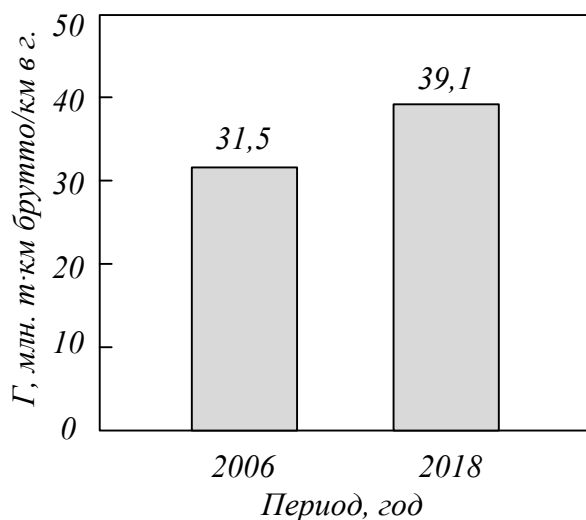


Рис. 1. Динамика грузонапряженности (G) железнодорожных путей

пути планируется переход на рельсы новой категории ДТ400ИК, для производства которых вероятно использование стали новой марки 100ХАФ. Рельсы категории ДТ370ИК планируются для массового использования вместо рельсов общего назначения категории ДТ350. Таким образом, имеет место тенденция к изменению химического состава рельсовых сталей: повышение содержания углерода, одновременное легирование несколькими элементами и увеличение их концентраций в стали (табл. 1).

Изменение химического состава рельсовых сталей оказывает значительное влияние на их пластические характеристики. Имеющиеся данные различных исследователей [1 – 6] свидетельствуют о тенденции к снижению пластичности сталей при увеличении содержания углерода и вышеперечисленных легирующих элементов. Этот факт необходимо учитывать при разработке режимов производства рельсов, поскольку снижение пластичности повышает вероятность образования дефектов в процессе прокатки. Данные различных исследователей не позволяют количественно оценить влияние химического состава стали на пластичность, что объясняется сложным характером процессов, протекающих в легированных сталях при горячей деформации. Фактически получение адекватных количественных зависимостей пластических свойств сталей конкретных марок от содержания в них примесных и легирующих элементов возможно только на основании экспериментальных исследований.

Представленная работа проводилась в рамках продолжения исследований влияния технологических параметров на пластичность рельсовых сталей вновь осваиваемых марок. Ранее проведенными исследованиями определены законо-

мерности изменения горячей пластичности сталей марок Э76ХФ и Э90ХАФ от температуры деформации [7 – 9]. Экспериментальные исследования горячей пластичности проводили методом горячего кручения на специализированной лабораторной установке. В качестве объекта исследований использовали образцы непрерывно литых заготовок сталей марок Э76ХФ и Э90ХАФ, произведенных в электросталеплавильном цехе АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК»); при этом выбор образцов для исследований осуществляли исходя из получения максимального интервала изменения содержания основных химических элементов (табл. 2). Исследования проводили при температуре деформации 1100 °С, что соответствует температуре максимальной пластичности сталей марок Э76ХФ и Э90ХАФ [4, 5] и скоростях деформации 1 и 10 с⁻¹.

На основании обработки экспериментальных данных, проведенной с использованием стандартной методики множественного регрессионного анализа, показано, что повышение содержания углерода, азота и серы в рассматриваемых интервалах изменения их концентраций снижает пластичность сталей Э76ХФ и Э90ХАФ, при этом с увеличением скорости деформации пластичность (Λ_p) уменьшается:

– сталь Э76ХФ, скорость деформации 1 с⁻¹:

$$\Lambda_p = 141,1 - 79,8[C] - 116,4[V] - 1844,5[N] - 680,1[S] - 727,8[P]; \quad (1)$$

– сталь Э76ХФ, скорость деформации 10 с⁻¹:

$$\Lambda_p = 124,5 - 73,2[C] - 109,4[V] - 1750,6[N] - 711,3[S] - 835,7[P]; \quad (2)$$

– сталь Э90ХАФ, скорость деформации 1 с⁻¹:

$$\Lambda_p = 76,7 - 30,2[C] - 57,1[V] - 873,9[N] - 321,5[S] - 433,6[P]; \quad (3)$$

– сталь Э90ХАФ, скорость деформации 10 с⁻¹:

$$\Lambda_p = 71,1 - 32,4[C] - 63,6[V] - 801,4[N] - 299,8[S] - 322,4[P]. \quad (4)$$

Снижение пластичности стали при увеличении содержания углерода является общеизвестным фактом, в особенности при высоких концентрациях данного элемента, что обусловлено выделением цементита Fe₃C по границам зерен. Повышение содержания ванадия и азота в стали

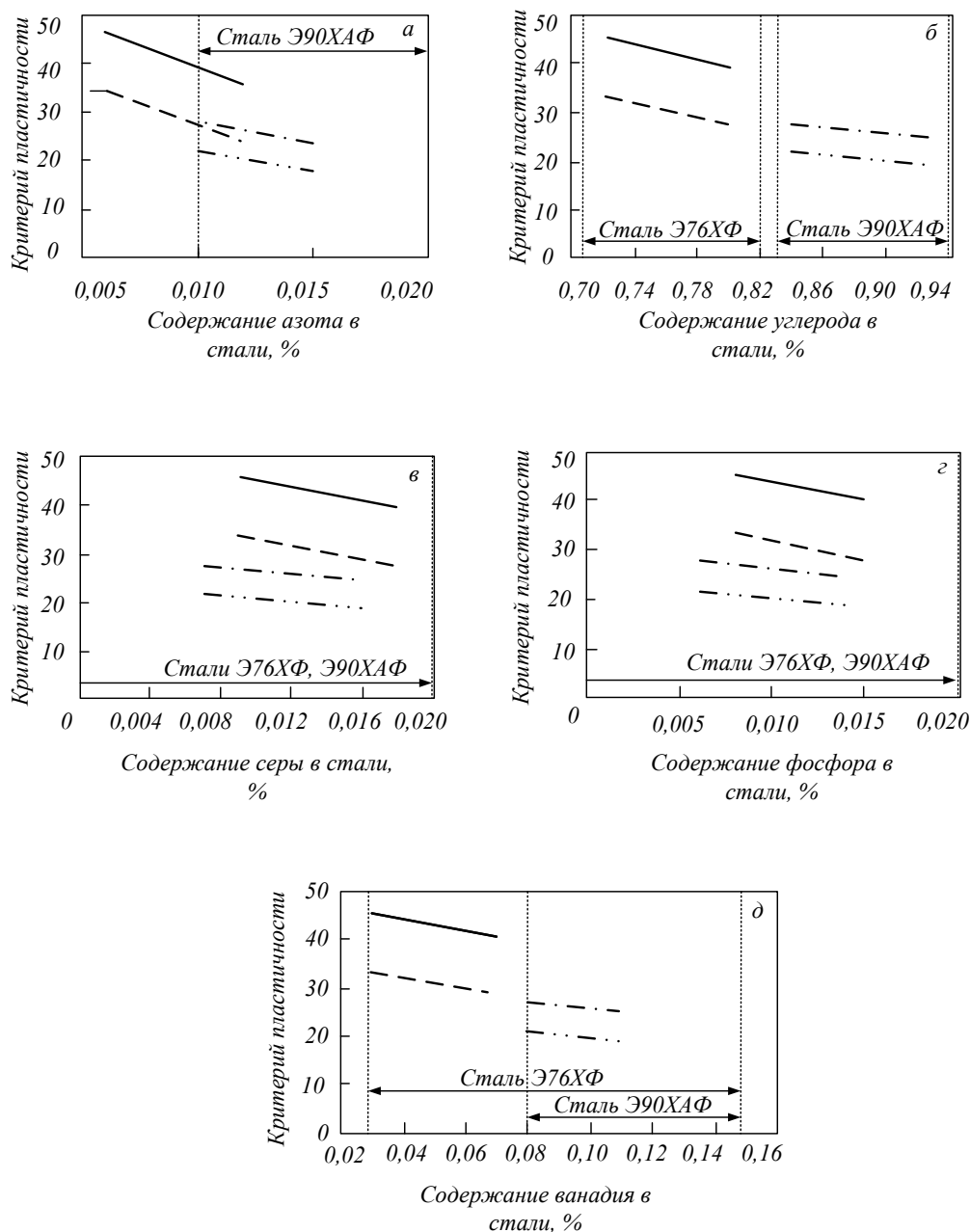


Рис. 2. Зависимости максимальной пластичности рельсовых сталей (марок Э90ХАФ и Э76ХФ по ГОСТ Р 51685 – 2013) от содержания азота (а), углерода (б), серы (в), фосфора (г) и ванадия (д),
 — и — — — — сталь марки Э76ХФ при скорости деформации 1 и 10 c^{-1} ;
 - - - - и - - - - - сталь марки Э90ХАФ при скорости деформации 1 и 10 c^{-1}

приводит к увеличению концентрации карбидов и карбонитридов ванадия, что ухудшает ее пластические свойства. По данным работы [10] в высокоуглеродистой литой стали, легированной ванадием и азотом, карбиды и карбонитриды ванадия располагаются преимущественно внутри зерен, при этом образование карбонитридов ванадия возможно даже при отсутствии легирования азотом – достаточным является остаточное содержание азота в электростали. Влияние серы и фосфора на пластичность связано с выпадением сульфидов и фосфидов по границам зерен при кристаллизации стали, что обусловлено значительным снижением растворимости данных элементов.

С целью оценки количественного влияния концентрации вышеперечисленных элементов на максимальную пластичность стали проведен вычислительный эксперимент. С использованием полученных уравнений регрессии рассчитаны прогнозные значения пластичности сталей Э76ХФ и Э90ХАФ по методике, сущность которой заключается в изменении содержания одного элемента при неизменном среднем содержании остальных элементов в рамках рассматриваемого интервала. По полученным данным в количественном отношении наибольшее влияние на максимальную горячую пластичность рельсовых сталей оказывает содержание азота (рис. 2, а).

Т а б л и ц а 1

Изменение химического состава рельсовых сталей

Сталь марки	Содержание химических элементов, %									
	C	Mn	Si	V	Cr	N	S	P	Cu	Ni
ГОСТ Р 51685 – 2000										
Э76Ф, К76Ф	0,71 – 0,82	0,75 – 1,15	0,25 – 0,60	0,03 – 0,15	≤ 0,20	–	≤ 0,025	≤ 0,025	≤ 0,20	≤ 0,20
ГОСТ Р 51685 – 2013										
76ХФ	0,71 – 0,82	0,75 – 1,25	0,25 – 0,60	0,03 – 0,15	0,20 – 0,80	–	≤ 0,020	≤ 0,020	≤ 0,20	≤ 0,15
90ХАФ	0,83 – 0,95	0,75 – 1,25	0,25 – 0,60	0,08 – 0,15	0,20 – 0,60	0,010 – 0,020	≤ 0,020	≤ 0,020	≤ 0,20	≤ 0,15

Т а б л и ц а 2

Фактический химический состав исследуемых рельсовых сталей

Сталь марки	Содержание химических элементов, %									
	C	Mn	Si	V	Cr	N	S	P	Cu	Ni
Э76ХФ	0,72 – 0,80	0,82 – 0,97	0,39 – 0,56	0,03 – 0,07	0,36 – 0,54	0,006 – 0,012	0,009 – 0,018	0,008 – 0,015	0,07 – 0,14	0,05 – 0,11
Э90ХАФ	0,84 – 0,93	0,76 – 0,95	0,42 – 0,53	0,08 – 0,11	0,24 – 0,39	0,010 – 0,015	0,007 – 0,016	0,006 – 0,014	0,06 – 0,12	0,03 – 0,12

Влияние углерода, серы и фосфора выражено менее значительно (рис. 2, б – з), несмотря на заметно более широкий интервал изменения их содержания, что также свидетельствует в пользу преобладающего влияния азота на пластичность стали. Фактический интервал изменения содержания углерода охватывает практически весь диапазон изменения его концентрации согласно ГОСТ (рис. 2, б); диапазон изменения содержания серы составляет 0,009 % для обеих исследуемых сталей, фосфора – 0,007 – 0,008 %, при этом верхний предел близок к максимально допустимой концентрации согласно требований ГОСТ (0,020 %) (рис. 2, в, з). Из перечисленных элементов наименьшее влияние на пластичность оказывает ванадий (рис. 2, д), что объясняется достаточно узким интервалом изменения его концентрации: содержание данного элемента находится ближе к нижнему пределу требований ГОСТ, что обусловлено стремлением снизить себестоимость стали.

Полученные данные о влиянии скорости деформации на пластичность свидетельствуют, что при увеличении скорости деформации с 1 до 10 с⁻¹ максимальная пластичность стали марки Э76ХФ снижается на 27 – 33 % при прочих равных условиях, а для стали марки Э90ХАФ отмечается уменьшение максимальной пластичности на 21 – 24 % (рис. 2). Этот факт объясняется тем, что при увеличении скорости деформации происходит уменьшение времени протекания процесса рекристаллизации и, следовательно, увеличивается упрочнение стали.

Выводы

На основании экспериментальных исследований получены регрессионные зависимости максимальной пластичности рельсовых сталей марок Э76ХФ и Э90ХАФ от изменения содержания примесных и легирующих элементов в рамках интервала их изменения согласно действующего ГОСТ при различных скоростях деформации. Показано, что увеличение содержания углерода, азота, ванадия, серы и фосфора обуславливает уменьшение максимальной пластичности рассматриваемых рельсовых сталей; при этом наибольшее количественное влияние на снижение пластичности оказывает азот, что связано с образованием карбонитридов ванадия. Установлено, что повышение скорости деформации рельсовых сталей марок Э76ХФ и Э90ХАФ с 1 до 10 с⁻¹ приводит к снижению пластичности на 27 – 33 и 21 – 24 % соответственно при прочих равных условиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дзугутов М.Я. Пластичность и деформируемость высоколегированных сталей и сплавов. – М.: Металлургия, 1990. – 303 с.
2. Бирза В.В., Бирза А.В. Классификация сталей по показателю предельной пластичности при обработке давлением // Сталь. 2010. № 7. С. 66 – 71.
3. Дженсто С.Г. Влияние характеристик выплавки и разлива на горячую пластичность балочной, сортовой и слябовой заготовки из

- ниобийсодержащих сталей // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 9. С. 13 – 20.
4. Колпишон Э.Ю., Иванова М.В., Афанасьев С.Ю., Шитов Е.В. Влияние химического состава на технологическую пластичность азотсодержащей аустенитной стали // Электрометаллургия. 2006. № 11. С. 40 – 44.
 5. Перетяtko В.Н., Темлянцев М.В., Филиппова М.В. Развитие теории и практики металлургических технологий. Т. 2. Пластичность и разрушение стали в процессах нагрева и обработки давлением. – М.: Теплотехник, 2010. – 352 с.
 6. Гладовский С.В., Потапов А.И., Салихьянов Д.Р., Фомин А.В., Гриценко И.С. Исследование сопротивления деформации и пластичности низко- и среднеуглеродистых конструкционных сталей с целью повышения качества проката // Калибровочное бюро. 2015. № 5. С. 45 – 64.
 7. Уманский А.А., Головатенко А.В., Симачев А.С., Дорофеев В.В., Осколкова Т.Н. Исследования пластичности и сопротивления деформации легированных рельсовых сталей в температурном интервале прокатки // Изв. вуз. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 6. С. 452 – 460.
 8. Уманский А.А., Головатенко А.В., Темлянцев М.В., Дорофеев В.В. Экспериментальные исследования пластичности и сопротивления деформации хромистых рельсовых сталей // Черные металлы. 2019. № 6. С. 24 – 28.
 9. Уманский А.А., Филиппова М.В., Темлянцев М.В., Головатенко А.В., Симачев А.С. Разработка теоретических основ повышения энергоэффективности процессов пластической деформации сложнолегированных сталей специального назначения при их обработке давлением. – В кн.: Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии. 2017. № 39. С. 73 – 82.
 10. Гарост А.И. Неметаллические включения и формирование структуры модифицированной высокомарганцовистой стали // Литье и металлургия. 2006. № 1 (37). С. 75 – 83.
- © 2020 г. А.А. Уманский, А.В. Головатенко,
А.С. Симачев
Поступила 6 ноября 2019 г.