

2. Фейлер С.В., Числавлев В.В. Лабораторно-экспериментальный комплекс для изучения процессов гидродинамики при непрерывной разливке стали // Современные вопросы теории и практики обучения в вузе: сборник научных трудов. – Новокузнецк : СибГИУ, 2015. – Вып. 18. – С. 62-72;

3. Пат. № 164038, Российская Федерация, МПК G 09B 25/02. Лабораторная установка для моделирования гидродинамики металлического расплава: / Фейлер С.В., Протопопов Е.В., Числавлев В.В., Неунывахина Д.Т.; правообладатель Сибирский государственный индустриальный университет. – № 2015142557; заявл. 06.10.15; опубл. 20.08.16, Бюл. № 23 – 1с.: 1ил.;

4. Guthrie R.I.L., Isac M.M. Continuous Casting Practices for Steel: Past, Present and Future // Metals. – 2022, 12, 862. <https://doi.org/10.3390/met12050862>;

5. Tang H.Y., Liu J., Wang K.M., Xiao H., Li A.W., and Zhang J.Q. Progress and perspective of functioned continuous casting tundish through heating and temperature control. Acta Metallurgica Sinica. – 2021. – Vol. 10, pp. 1229–1245;

6. Levenspiel O. Chemical Reaction Engineering. – 3rd ed., New York, 1999. – 668 p.;

7. Tang H.Y., Guo L.Z., Wu G.H., Xiao H., Yao H.Y., and Zhang J.Q. Hydrodynamic modeling and mathematical simulation on flow field and inclusion removal in a seven-strand continuous casting tundish with channel type induction heating. Metals. – 2018. – Vol. 8. – No. 6, id. 374.

ОСВОЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ПРУЖИННОЙ КАТАНКИ ДЛЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В УСЛОВИЯХ МЕЛКОСОРТНО-ПРОВОЛОЧНОГО СТАНА 370/150

Ходосовская Н.А., Ковалева И.А., Путеев В.С.

ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин

Аннотация. Пружинные стали характеризуются повышенным пределом текучести и упругости. Это важнейшая характеристика такого металла – выдерживать механические нагрузки без изменения своей первоначальной формы. Современная техника предъявляет высокие требования к качеству пружинного проката в плане обеспечения технологичности при его переработке и эксплуатационных характеристик пружин. В данной работе пойдет речь о разработке и освоении производства пружинных сталей в условиях мелкосортно-проволочного стана 370/150 ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» на примере катанки из диаметра 15,0 мм стали марки 54SiCr6 для производства пружин, используемых в амортизаторах автомобилей.

Ключевые слова: рессорно-пружинная сталь, непрерывная разливка, мягкое обжатие, горячая прокатка, катанка, химическая чистота стали, макроструктура, неметаллические включения, качество поверхности, микроструктура, механические свойства.

Пружинные стали характеризуются повышенным пределом текучести и упругости. Это важнейшая характеристика такого металла – выдерживать механические нагрузки без изменения своей первоначальной формы. То есть металл, подвергающийся растяжению или наоборот сжатию (упругой деформации), после снятия с него действующих сил должен оставаться в первоначальной форме без остаточной деформации.

По наличию дополнительных свойств пружинная сталь подразделяется на легированную (нержавеющую) и углеродистую. За основу легированной стали берется углеродистая с содержанием углерода 0,65-0,85 % и легируется четырьмя основными элементами, всеми или выборочно, каждый из которых вносит свои особенности: хром, марганец, кремний, вольфрам.

Современная техника предъявляет высокие требования к качеству пружинного проката в плане обеспечения технологичности при его переработке и эксплуатационных характеристик пружин.

В части технологичности прокат должен обеспечивать возможность холодной обработке давлением (например, волочении) и (или) удаления дефектов (обточка, шлифовка, скальпирование), а также стабильное качество закалки при изготовлении пружин.

Деформируемость при холодной обработке давлением обеспечивается в первую очередь отсутствием грубых дефектов макроструктуры, а также получением однородной и достаточно дисперсной микроструктуры проката. Исходная микроструктура определяет также кинетику растворения цементита и гомогенизации аустенита при нагреве под закалку, поэтому грубая неоднородная исходная структура приводит к резкому ухудшению комплекса физико-механических характеристик пружин [1].

Надежность и максимально допустимые нагрузки при эксплуатации пружин определяются в большинстве случаев сопротивлением материала усталостному разрушению и релаксации напряжений. Релаксационная стойкость зависит в основном от содержания углерода и легирующих элементов в стали, а также режима закалки и отпуска или ТМО. На усталостную же прочность оказывает отрицательное влияние также загрязненность стали примесями и неметаллическими включениями (НВ), наличие дефектов поверхности и обезуглероженного слоя, причем это влияние тем сильнее, чем выше прочность стали. Поэтому для пружин ответственного назначения, особенно работающих при высоких динамических нагрузках, указанные показатели жестко нормируются [2].

В данной работе пойдет речь о разработке и освоении производства пружинных сталей в условиях мелкосортно-проволочного стана 370/150 ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» (далее – предприятие) на примере катанки из диаметром 15,0 мм стали марки 54SiCr6 для производства пружин, используемых в амортизаторах автомобилей.

Для обеспечения нужного комплекса качественных характеристик катанки из стали марки 54SiCr6 специалистами предприятия был осуществлен ряд мероприятий на всех стадиях производства металла – от выплавки стали до получения готового проката.

Требования потребителя в части ограничения количества примесей цветных металлов обеспечивали подбором шихты. Доводка металла осуществлялась в процессе внепечной обработки на установке печь-ковш и вакууматоре. С целью обеспечения целевых значений основных легирующих элементов и углерода использовали технологию поэтапной отдачи ферросплавов с промежуточным отбором проб для мониторинга и последующей корректировки химического состава. Окончательный этап внепечной обработки расплава заключался в доводке металла по температуре, содержанию углерода, серы, азота и проведении модифицирования стали присадками силикокальциевой проволоки с последующей усредняющей продувкой металла. Длительность внепечной обработки металла планировалась исходя из времени, необходимого для обеспечения требуемого химического состава, и составляла 120 минут и более.

Результаты определения химического состава плавки, а также регламентируемые пределы по марке 54SiCr6 приведены в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав плавки

Проба	Массовая доля химических элементов, %													
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	As	Mo	Sn	V	N2
Разливочная проба	0,54	1,46	0,69	0,01 1	0,00 8	0,69	0,0 5	0,0 7	0,00 4	0,006	0,00 8	0,00 9	0,00 5	0,00 7
Требования потребителя	min	0,51	1,30	0,60	-	-	0,60	-	-	-	-	-	-	-
	max	0,59	1,60	0,80	0,01 5	0,01 5	0,80	0,1 0	0,0 8	0,02 5	0,02	0,05	0,01 5	0,00 5

Как видно из данных таблицы 1, химический состав плавки полностью соответствовал требованиям потребителя. Выплавленная сталь характеризуется высокой чистотой по

примесям и остаточным элементам. Содержание серы и фосфора намного ниже норм EN 10270-2 (не более 0,020 % S и 0,020 % P) [3] на закаленную и отпущенную пружинную проволоку класса «D» (для пружин, работающих при высоких динамических нагрузках). Только по содержанию меди (0,08 %) сталь несколько выходит за рамки требований к указанной продукции (не более 0,06 %). Однако, требований по столь низкому содержанию меди конкретный потребитель не предъявлял. Для предприятия, имеющего опыт массового производства стали высокой чистоты для производства металлокорда, обеспечение содержания меди не более 0,06 % не является серьезной проблемой.

Обеспечение чистоты стали по неметаллическим включениям достигалось за счет:

- присадки легирующих элементов, способствующих образованию неметаллических включений, на нижний марочный предел;
- смещения раскисления металла алюминием на начальный этап выпечной обработки с целью ассимиляции продуктов раскисления в шлак;
- интенсивного перемешивания металла, в том числе, использование сталеразливочных ковшей с двумя продувочными фурмами, для обеспечения удаления неметаллических включений в шлак, а также их измельчения и усреднения по объему расплава.
- подбора качественных огнеупорных материалов для футеровки тепловых агрегатов и изделий для металлопроводки.

Качественную макроструктуру обеспечивали за счет подбора оптимальных параметров электромагнитного перемешивания жидкого металла при непрерывной разливке. С целью оценки влияния «мягкого» обжата на одном ручье разливку проводили с использованием данной технологии, на другом – без «мягкого» обжата. Для исследования макроструктуры отбирались поперечные макротемплеты. Оценка макроструктуры непрерывнолитых заготовок проводилась в соответствии с ГОСТ Р 58228-2018 [4], результаты представлены в таблице 2. Фотографии макроструктуры поперечного сечения непрерывнолитых заготовок приведены на рисунке 1.

Таблица 2. Результаты оценки макроструктуры поперечного сечения непрерывнолитой заготовки

Технология	ГОСТ Р 58228-2018, балл						
	ЦП	ОЛ	ЛПиТо б	ЛПиТос	ЛПиТуг л	СП	КТЗ
без «мягкого» обжата	2,0	2,0	0	0	0	0	0
с «мягким» обжатием	0,5	0,5	0	0	0	0	0

ЦП - центральная пористость; ОЛ – осевая ликвация; ЛПиТ (об) – ликвационные полосы и трещины (общие); ЛПиТ (ос) - ликвационные полосы и трещины (осевые); ЛПиТ(угл) - ликвационные полосы и трещины (угловые); СП – светлая полоса; КТЗ – краевые точечные загрязнения



а) без применения «мягкого обжата»



б) с применением «мягкого» обжата

Рисунок 1. Поперечное сечение непрерывнолитой заготовки сечением 250x300мм стали марки 54SiCr6

По итогам проведенного эксперимента было получено подтверждение положительного влияния «мягкого» обжата на такие дефекты макроструктуры, как «осевая ликвация» и «центральная пористость».

При оценке качественных характеристик катанки диаметром 15,0 мм из марки стали 54SiCr6 были проведены следующие металлографические исследования: загрязненность неметаллическими включениями, качество макро- и микроструктуры, наличие мартенситных участков, ликвация, наличие и глубина поверхностных дефектов, глубина обезуглероженного слоя.

Оценка неметаллических включений в продольном сечении осуществлялась согласно стандарту ASTM E45 [5]. Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3. Оценка загрязненности неметаллическими включениями

Номер пробы	Диаметр, мм	Вид включений, балл							
		А		В		С		D	
		тонкие	толстые	тонкие	толстые	тонкие	толстые	тонкие	толстые
1	15,0	1,0	0	0,	0	0	0	0,5	0
2		1	0	0	0	0	0	0,5	0
3		1,5	0	0,5	0	0	0	0,5	0
4		1	0	0	0	0	0	0,5	0
5		1,0	0	0,5	0	0	0	1,0	0
6		1	0	0	0	0	0	0,5	0
Требования		2,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0
А – сульфиды, В – оксиды строчечные, С – силикаты; D – шаровидные оксиды									

По результатам оценки неметаллических включений в катанке было установлено соответствие полученных значений установленным требованиям потребителя. Особо следует отметить низкое содержание наиболее опасных типов включений – оксидов, а также отсутствие крупных включений.

В таблицах 4-5 приведена оценка макро- и микроструктуры катанки, глубина обезуглероженного слоя и поверхностных дефектов.

Таблица 4. Оценка микроструктуры и поверхностных дефектов

Н№ образца	Микроструктура	Мартенситные участки	Поверхностные дефекты
1	Феррит + перлит	отсутствуют	отсутствуют
2	Феррит + перлит	отсутствуют	отсутствуют

3	Феррит + перлит	отсутствуют	отсутствуют
4	Феррит + перлит	отсутствуют	отсутствуют
5	Феррит + перлит	отсутствуют	отсутствуют
6	Феррит + перлит	отсутствуют	отсутствуют
Требования потребителя	Феррит + перлит	Мартенситные участки не допускаются	Трещины и механические повреждения не допускаются

Таблица 5. Оценка макроструктуры и обезуглероженного слоя

Н№ образца	Макроструктура	Глубина обезуглероженного слоя,	
		мм	%
1	Удовлетворительная	0,08	0,53
2	Удовлетворительная	0,10	0,67
3	Удовлетворительная	0,08	0,53
4	Удовлетворительная	0,08	0,53
5	Удовлетворительная	0,09	0,60
6	Удовлетворительная	0,10	0,67
Требования потребителя	Такие внутренние дефекты как раковины и трещины, которые могут оказать негативное влияние на свойства при изготовлении и использовании пружин, в проволоке недопустимы	max 1% от диаметра	

В макроструктуре катанки отсутствуют усадочные раковины, рыхлости, пузыри, расслоения, внутренние трещины, шлаковые включения и флокены. Ликвация, которая может оказать негативное влияние на свойства при изготовлении и использовании пружин, отсутствует (рисунок 2). Как показывает опыт, такой уровень ликвации не вызывает затруднений при переработке катанки и не снижает эксплуатационные характеристики пружин.

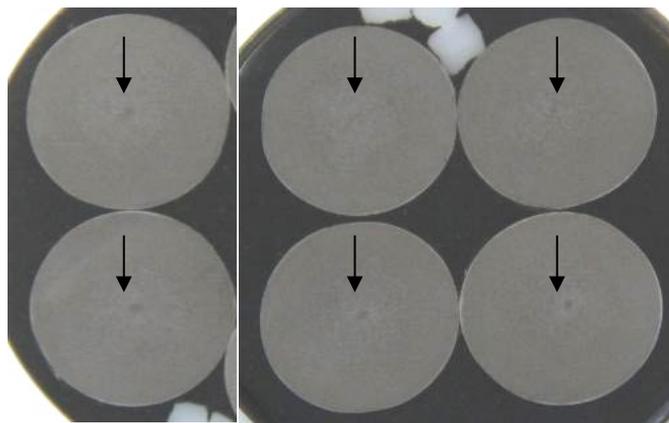


Рисунок 2. Макроструктура катанки диаметром 15,0 мм

Микроструктура после прокатки – феррито-перлитная (рисунок 3 а). Мартенситные участки в микроструктуре катанки не обнаружены. Общее обезуглероживание не превышает 0,1 мм, что составляет 0,53% от заданного диаметра (рисунок 3 б). Грубые поверхностные дефекты отсутствуют.

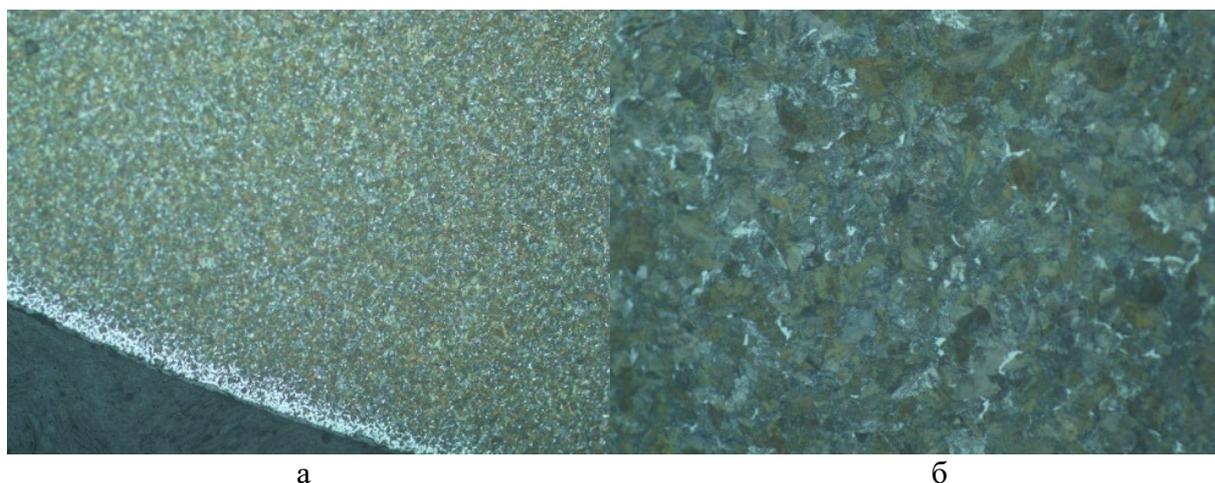


Рисунок 3. Обезуглероженный слой, увеличение $100\times$ (а) и микроструктура, увеличение $500\times$ (б) катанки диаметром 15,0 мм в поперечном сечении микрошлифа

Металлографический анализ показал, что качественные характеристики катанки диаметром 15,0 мм соответствуют заданным требованиям потребителя.

При проведении физико-механических испытаний катанки диаметром 15,0 мм стали марки 54SiCr6 были получены также удовлетворительные результаты (таблица 6).

Таблица 6. Результаты физико-механических испытаний

№ образца	Предел прочности σ_b , МПа	Относительное сужение ψ , %
1	1048	46
2	995	44
3	1042	50
Требования потребителя	900-1150	≥ 32

Таким образом, вышеописанные результаты испытаний катанки диаметром 15,0 мм из стали 54SiCr6 подтверждают возможности ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», как производителя высококачественного полуфабриката из легированных сталей, предназначенного для производства пружин ответственного назначения, работающих при высоких динамических нагрузках.

Список литературы

1. Ермаков Б. С., Теплухин В. Г., Ермаков С. Б. и др. Роль структурного фактора в формировании рабочих свойств, надежности и работоспособности пружин // «Пружина», №1(1), 2016, с. 27 – 33.
2. Крымчанский И. И. Пружинная проволока в мировой и отечественной промышленности // «Пружина», №1(1), 2016, с. 19 – 25.
3. Проволока стальная для механических пружин. Часть 2. Стальная пружинная проволока закаленная в масле и отпущенная: EN 10270-2:2012, - 20 с.
4. Заготовка стальная непрерывнолитая. Методы контроля и оценки макроструктуры: ГОСТ Р 58228-2018. – 50 с.
5. Стандартные методы испытаний для определения содержания включений в стали: ASTM E45-18a. – 37 с.