

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ПРУЖИН ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Г.А. Околович, В.И. Левков, Д.В. Кураков, Е.О. Чертовских,
С.В. Герман, М.В. Гертер

Механические свойства кремнистых пружинных сталей 55С2А, 60С2А могут быть повышены дополнительным экономным легированием хромом и ванадием, а также соответствующей термической обработкой.

Ключевые слова: пружинные стали, хрупкое разрушение, предел упругости, остаточный аустенит, закалка, отпуск, изотермическая закалка.

Колесные пары вагонов связаны с рамой тележки и кузовом вагона через систему упругих элементов и гасителей колебаний, называемую рессорным подвешиванием. Рессорное подвешивание за счет упругих элементов обеспечивает смягчение толчков и ударов, передаваемых колесами кузова. Кроме того (в некоторых случаях), рессоры и пружины передают направляющие усилия со стороны колес на раму тележки вагона. Когда колесная пара проходит какую-либо неровность пути (стыки, крестовины и т.п.), возникают динамические нагрузки, в том числе ударные. Появлению динамических нагрузок способствуют также дефекты колесной пары – местные пороки поверхностей, эксцентricность посадки колеса на ось, неуравновешенность колесной пары и др. При отсутствии рессорного подвешивания кузов жестко воспринимал бы все динамические воздействия.

Материал для рессор и пружин должен обладать высокой статической, динамической, ударной прочностью; достаточной пластичностью и сохранять свою упругость в течение всего срока службы. Все эти свойства материала зависят от его химического состава, структуры, термической обработки и состояния поверхности упругого элемента.

Для изготовления пружин железнодорожных вагонов по ГОСТ 1452-2011 применяют горячекатаный круглый прокат из конструкционных рессорно-пружинных сталей марок 55С2, 60С2, 55С2А, 60С2ХА и других марок по ГОСТ 14959-79 категории 3А, 3Б, 3В, 3Г. На заводе ОАО «Алтай вагон» пружины грузовых вагонов изготавливают из кремнистых сталей 55С2 и 60С2.

Широкое применение кремнистой стали 55С2 (60С2) обусловлено рядом преимуществ этой стали по технологическим и механическим свойствам по сравнению с углеродистой, а также сравнительно невысокой

стоимостью и не дефицитностью. Вместе с тем, кремнистая сталь обладает рядом недостатков, таких, как повышенная склонность к обезуглероживанию.

Технология изготовления цилиндрических винтовых пружин предусматривает выполнение следующих операций: контроль стали перед пуском в производство, резка прутков, оттяжка концов заготовки, нагрев под навивку и навивка, термообработка, упорочнение, сжатие для снятия остаточных деформаций, обработка торцов, испытание, контрольная проверка и окрашивание с последующей сушкой.

Прокат по ГОСТ 14955-77 должен быть с обточенной или шлифованной поверхностью с параметрами шероховатости Rz не более 20 мкм.

Заготовки нарезают в холодном или нагретом до температуры 750–900 °С состоянии на пресс-ножницах или эксцентриковых прессах.

Перед навивкой концы заготовок нагревают в щелевых печах до температуры 900–950 °С.

Температура в конце оттяжки не менее 800 °С. В действительности она превышает 900 °С продолжительность нагрева 8–15 мин в зависимости от диаметра прутка. Концы оттягивают на молоте или на ковочных (обжимных) вальцах. После оттяжки на боковую поверхность оттянутого конца пружины в горячем состоянии наносят маркировку: порядковый номер по системе нумерации предприятия-изготовителя; год и месяц; марку стали.

Пружины навивают и закаляют с одного нагрева заготовки до температуры 900–950 °С в полуметодической печи. Продолжительность нагрева должна быть 10–30 мин в зависимости от диаметра прутка заготовки пружины.

Навивку нагретых прутков выполняют на специальных станках. После навивки выравнивают шаг витков на калибровочном прессе, поджимают концы пружины и проверяют ее высоту, а при помощи угольника определяют перпендикулярность пружины к ее опорной поверхности по высоте.

Пружины должны быть термически обработаны на твердость от 375 до 444 НВ или от 41,4 до 46,0 HRC, что достигается закалкой с последующим отпуском.

Наши наблюдения за технологией нагрева, вальцовки, навивки и закалки показали отсутствие грубых нарушений технологий. Однако, трещины на поверхности торцов все-таки появляются: как при вальцовке, так и навивке с закалкой.

При вальцовке торцов трещины образуются от перегрева в печи. Кроме того, пруток следует нагревать на расстоянии 350 мм от торца, так как при вальцовке поверхностные слои в торце охлаждаются и уменьшаются в объеме, тогда как внутренние слои разогреваются и расширяются, создавая растягивающие напряжения в поверхностных слоях. Подтверждение этому явлению служит образования трещин на расстоянии 100–150 мм от торца.

В результате чего концы заготовки – опорные витки пружины, имеют двойной нагрев (перегрев), а цилиндрическая часть заготовки – рабочие витки нагреваются однократно. Поэтому в переходной зоне структура металла неоднородна. Вследствие чего большие и малые пружины рессорного комплекта при эксплуатации имеют характерный излом опорного витка в переходной зоне от плоской поверхности к рабочему витку.

Закалочным трещинам предшествуют дефекты при вальцовке – закат, обезуглероживание и разветвление трещины при закалке (рисунок 1).

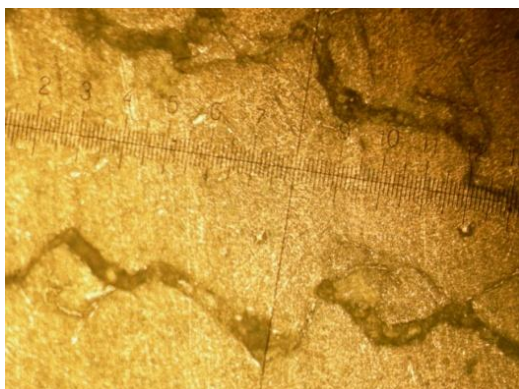


Рисунок 1 – Разветвление трещины от вальцовки, x100

Рекомендуемая при охлаждении в воде температура закалки 830–870 °С не выдерживается. Пружины из нагревательной печи скатываются по наклонной плоскости на конвейер, а затем в бак, где закаливаются. Закалочная среда – вода при температуре 30–40 °С.

Пруток для навивки нагревается до 930–950 °С, что допустимо при кратковременной выдержке. Однако вследствие отсутствия подстуживания до 870 °С и выравнивания температуры по длине прутка при мартенситном превращении образуются трещины напряжения (рисунок 2). Кроме того, после закалки на начальном витке твердость пониженная (HRC 30-40), а на конечном – повышенная (до 60 HRC).

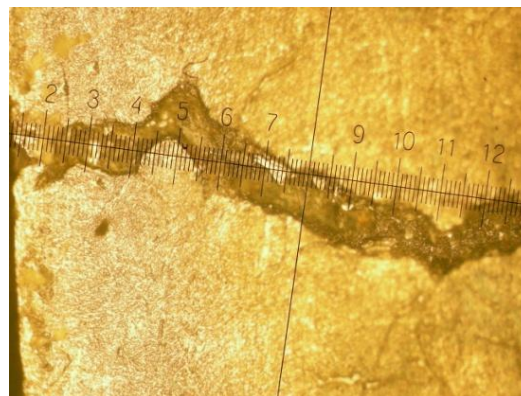


Рисунок 2 – Раскрытие трещины после закалки, x100

Для улучшения механических свойств и устранения внутренних напряжений все пружины после закалки подвергают отпуску в двухзонных конвейерных печах.

При этом наибольший интервал между закалкой и отпуском допускается не более 4 часов. Температура отпуска должна быть в пределах 480–520 °С. Однако температура в печи повышается до 550 °С. В случае неравномерного нагрева при закалке и повышения температуры при отпуске приводит к тому, что одна сторона пружины мягкая «садится», (≤ 40 HRC), другая – твердая «хрупкая» – (≈ 50 HRC). И то и другое – недопустимо!

Остаточную деформацию снимают однократным сжатием до соприкосновения витков с выдержкой 5–8 секунд.

Слитки и прокат из кремнистой стали типа 55С2-60С2 характеризуются значительной химической неоднородностью по содержанию углерода и кремния.

При оценке свойств кремнистых пружинных сталей необходимо учитывать их металлургические и технологические характери-

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ПРУЖИН ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

ки. В процессе прокатки профилей кремнистой стали из-за ликвации кремния обнаруживается резко выраженная полосчатость, а после охлаждения в структуре образуется ферритная полосчатость.

Если даже этой полосчатости в прокате нет, то она возникает вновь в процессе нагрева до температуры закалки стали, достигая 4–5 балла в середине профиля. Наличие сильной зональной ликвации углерода и дендритной ликвации кремния требует различной температуры аустенизации изделий, полученных из разных частей прокатного слитка. При этом науглероживание участков аустенита, обогащенных кремнием, происходит весьма медленно и выравнивание концентрации углерода в условиях ликвации кремния может вообще не происходить. Поэтому при выборе оптимального режима закалки надо учитывать необходимость получения аустенита достаточно высокой однородности, даже при значительной химической неоднородности стали в исходном состоянии.

Кроме того, выявлена сильная полосчатость структуры – наличие более светлых, обогащенных марганцем, и более темных, обогащенных кремнием, полосок, появление которых является результатом дендритной ликвации.

Температура закалки пружин, обеспечивающая получение мелкокристаллического мартенсита, соответствует 860–875 °С для стали 55С2 и 850–870 °С с охлаждением в масле или воде для стали 60С2. После закалки достигается максимальная твердость, а после отпуска при 400–470 °С – оптимальное сочетание прочности и пластичности.

Максимальная усталостная прочность рессор из стали 55С2 достигается после высокотемпературного нагрева под закалку. Повышение температуры закалки до 880–890 °С улучшает и статические свойства стали 60С2.

Причины положительного влияния нагрева до повышенных температур, повышающих рекомендованные ГОСТом (870 °С) и зарубежные стандартами, не установлены. Можно предположить, что основной причиной является повышение химической неоднородности аустенита как по содержанию кремния, так и зависящей от нее однородности распределения углерода.

Однако повышение температуры закалки сверх 960–980 °С недопустимо, так как оно может привести к перегреву и обезуглероживанию (рисунок 3).

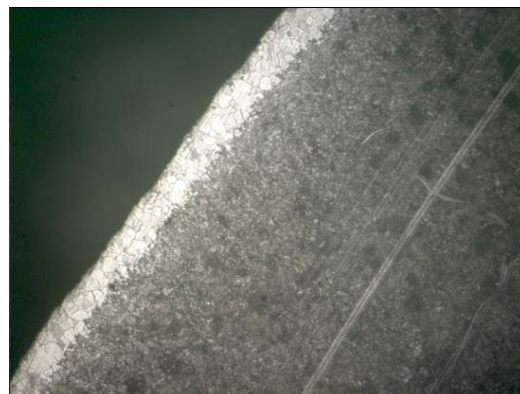


Рисунок 3 – Обезуглероженный слой опорного витка, x100

Максимум предела упругости, повышенная пластичность и вязкость достигается при температуре отпуска 400–450 °С.

Упругие элементы после отпуска целесообразно охлаждать в воде, поскольку, во-первых, при этом в поверхностном слое возникают сжимающие остаточные напряжения, а во-вторых, быстрое охлаждение от температуры отпуска при 500–540 °С предупреждает появление обратимой отпускной хрупкости, но вызывает коробление деталей. Эта отпускная хрупкость, кроме повышения порога хладноломкости, облегчает зарождение усталостных трещин и увеличивает скорость их распространения.

В структуре стали 60С2 после закалки и отпуска при 250–500 °С одновременно присутствуют карбидные фазы: ϵ , χ , Fe_3C . Максимальное количество ϵ -карбида отмечается при температуре 350 °С, χ -карбида – при температуре 400 °С. После отпуска при более высоких температурах преимущественной присутствует цементит (Fe_3C). Кремний увеличивает устойчивость ϵ -карбида и стабилизирует структуру мартенсита и остаточного аустенита.

Исследование строения мартенсита кремнистой пружинной стали показало, что начальные стадии этого процесса контролируются диффузией углерода, но затем контролирующим фактором становится диффузия кремния в ϵ -карбиде, которая повышает устойчивость ϵ -карбида и поэтому цементит появляется в кремнистой стали лишь после отпуска при 400 °С, тогда как в углеродистой стали – уже после отпуска при 250 °С.

Совмещение при изготовлении пружин навивки и закалки с одного нагрева при регламентированных условиях деформации и охлаждения является по существу технологическим процессом термомеханической об-

работки, т. к. полученные в процессе деформации структурные изменения аустенита наследуются мартенситом и сохраняются после отпуска.

Повышение температуры нагрева кремнистой стали при закалке важно не только для последующего деформирования переохлажденного аустенита, но и для увеличения усталостной прочности упругих элементов. Так, по данным [1], предел выносливости стали 60С2 после закалки с 870 °С и отпуска при 480 °С на твердость 40...46 HRC составляет 343 Мн/м², а после закалки с 960...980 °С и того же отпуска он равен 392 Мн/м² (т.е. на 50 Мн/м² больше). Максимальная усталостная прочность стали 55С2 также достигается после высокотемпературного нагрева под закалку.

Сертификационные испытания пружин показали, что предельные отклонения прогиба пружин S_1 под расчетной статической нагрузкой по нормативному документу составляет от -3,4 до +4,8, а в действительности +5,3, что выше нормы. Такая остаточная деформация связана с неполной прокаливаемостью стали 60С2А в сечении Ø30 мм. Да и число циклов нагружений для серийно выпускаемых пружин составило $0,4 \cdot 10^6$ вместо $0,5 \cdot 10^6$ (рисунок 4).

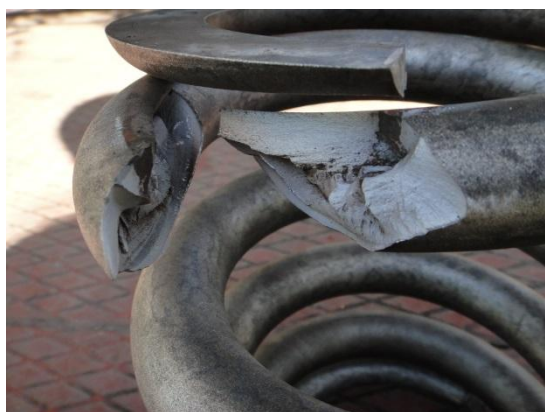


Рисунок 4 – Усталостный излом витков пружин

В тоже время в пружинах Ø30 мм твердость повышенная – 47 HRC при норме 46,5 HRC, что говорит о перегреве при закалке с увеличением количества остаточного аустенита и отклонения прогиба пружины S_1 , а также пониженной усталостной прочности вследствие крупного зерна.

После термической обработки пружинная сталь должна также содержать минимальное количество остаточного аустенита, так как он отличается более низким, чем мартенсит,

пределом упругости и в его присутствии снижается сопротивление умеренным и малым пластическим деформациям изделия [2].

По этой причине, а также из-за возможности превращения остаточного аустенита в мартенсит при нагружении и особенно при охлаждении до низких температур, сталь, содержащая в структуре аустенит, обладает пониженной релаксационной стойкостью и склонностью к замедленному разрушению, в результате чего происходит преждевременное разрушение пружин в условиях статического нагружения.

В связи с этим, чтобы уменьшить количество остаточного аустенита, в процессе термической обработки пружин используют все известные методы, в частности рационально выбирают условия закалки – температуру и скорость нагрева, а также охлаждения.

Так как в процессе отпуска пружин остаточный аустенит может претерпевать превращение и это ведет к росту предела упругости, продукты этого превращения характеризуются меньшим сопротивлением малым пластическим деформациям, чем продукты превращения мартенсита.

Для надежной работы пружин в условиях длительного статического и динамического нагружения, а также при наличии концентраторов напряжений режим отпуска, помимо высокого уровня предела упругости, должен обеспечить определенный уровень пластичности и вязкости при повышенном сопротивлении хрупкому разрушению.

По указанным причинам режим отпуска должен быть строго регламентированным не только по температуре, но и по продолжительности.

Следовательно, превышение нормы отклонения прогиба пружины под расчетной статической нагрузкой и снижение числа циклов до разрушения связано с перегревом и обезуглероживанием сталей 55С2 и 60С2. Однако перегрев сопровождается не только увеличением прокаливаемости, но и ростом зерна, количеством остаточного аустенита и его стабилизацией.

Как известно, обезуглероживание, крупное зерно и остаточный аустенит снижают упругие свойства сталей. По этой причине на заводе осваивают в производстве пружин сталь 60С2ХФА с наименьшей склонностью к росту зерна аустенита, в которой при нагреве до 1050 °С сохраняется мелкозернистая структура.

При отпуске после закалки в масле хром и ванадий оказывают замедляющее действие на процессы распада пересыщенного твердо-

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ПРУЖИН ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

го раствора в кремнистой стали. Так в стали 60С2А сохраняется ориентировка структуры по мартенситу до температуры отпуска 450...500 °С, а у стали 60С2ХФА до 550 °С.

Сталь 60С2ХФА, показавшая лучшее сочетание технологически и механических свойств, является перспективной для пружин рессорного подвешивания большегрузных вагонов железнодорожного транспорта.

Однако закалка в масле стали 60С2ХФА при массовом (серийном) производстве неприемлема, а при охлаждении в воде (как сталь 60С2) сопровождается трещинами; охлаждение в полимерных средах также вызывает трещины.

Оптимальным режимом упрочняющей термической обработки высокопрочной стали 60С2ХФА является изотермическая закалка на нижний бейнит с отпуском по следующему режиму: нагрев до 880–900 °С, изотермическая выдержка пружин с диаметром прутка до 40 мм при температуре 290–330 °С в течение 45–60 мин и отпуск при температуре 300–325 °С в течение 1 часа на твердость HRC 45–51.

ВЫВОДЫ

1. Изотермическая закалка выполняется охлаждением в жидких средах – расплавах солей.

2. При охлаждении в кипящем слое можно получить структуру и свойства изделий аналогичные, получаемым при изотермической закалке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рахштадт, А. Г. Пружинные стали [Текст] : / А. Г. Рахштадт. – М. : Металлургия, 1971. – 495 с.

2. Околович, Г. А. О сопротивлении инструментальных сталей усталостному разрушению. / Г. А. Околович, А. В. Семичастная, В. Ф. Моисеев // *Металлорежущий и контрольно-измерительный инструмент.* – 1973. – № 6.

3. Околович, Г. А. Свойства пружинных сталей после термообработки и деформационного упрочнения / Г. А. Околович, А. Г. Околович, А. М. Гурьев // XV Международная научно-техническая конференция студентов и молодых ученых. – Томск. – 2009. – С. 112–114.

4. Эйфер, М. Ю. Исследование циклической прочности пружинных сталей [Текст] / М. Ю. Эйфер // Пути повышения долговечности деталей подвижного состава, железнодорожных устройств и машин : сб. тр. МИИТА. – М. – 1966. – № 220.

Околович Геннадий Андреевич – д.т.н., профессор кафедры МТЮ, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова.

Левков Виктор Илларионович – аспирант кафедры МТЮ, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова.

Кураков Дмитрий Владиславович – инженер-технолог ОАО «АВЗ».

Чертовских Евгений Олегович – аспирант кафедры МТЮ, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова.

Герман Светлана Викторовна – аспирант кафедры МТЮ Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова.

Гертер Михаил Владимирович – аспирант кафедры МТЮ Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова.

mtio.10@mail.ru, aspirant007@list.ru