

Результаты исследования стали А5Т для осей колесных пар

Применение высокопрочных улучшенных сталей для изготовления осей колесных пар в настоящее время активно обсуждается специалистами. В научно-исследовательском проекте, выполненном Федеральным агентством по испытаниям и исследованиям материалов (BAM, Берлин) по заказу Союза предприятий железнодорожной промышленности Германии (VDB), образцы из стали А5Т (42CrMo4 + QT) вырезали из изъятых из эксплуатации осей колесных пар. В других проектах исследовались также опытные образцы колесных пар, изготовленные в масштабе 1:1.

Система колесо — рельс доказывает свою техническую надежность и экономическую целесообразность с начала развития железнодорожного транспорта до наших дней. Она пригодна, с одной стороны, в грузовом сообщении для осевой нагрузки до 35 т, с другой стороны, в пассажирском сообщении для движения со скоростью до 330 км/ч в обычной эксплуатации. Известный мировой рекорд поезда AGV (Франция) в апреле 2007 г. в экспериментальных условиях доказал техническую пригодность этой системы для скорости до 575 км/ч.

Техническое исполнение элементов пути и ходовой части непрерывно совершенствуется. Это в равной степени относится к размерам, конструкции, технологии изготовления узлов и деталей, и прежде всего к используемым материалам.

Сталь А5Т применяется для изготовления осей колесных пар не только высокоскоростных поездов, но и региональных моторвагонных. Она относится к высококачественным материалам и отличается прежде всего высокими

механическими показателями, которые допускают уменьшение диаметра оси и тем самым снижают ее массу. Это безусловно желательно, так как с меньшей непродессоренной массой снижаются статические и особенно динамические нагрузки на ходовую часть и путь. Конечно, с повышением прочности уменьшается ударная вязкость и появляется опасность хрупкого излома.

Причины запуска научно-исследовательского проекта

Еще в начале 1999 г. специалистами VDB была предложена тематика научно-исследовательского проекта, посвященного повышению надежности разрабатываемых элементов ходовой части без значительного повышения затрат на их производство.

Целью предлагавшегося проекта была разработка современной концепции расчетов надежности и экономичности конструкции ходовых механизмов. Это относится и к расчетным нагрузкам, определяемым

эксплуатационными измерениями, и к испытаниям на усталостную прочность реальных осей колесных пар, изготовленных из сталей четырех марок, применяемых в Германии:

- А1N по МСЖД 811-1, или С35 по стандарту ISO 683-1;
- А4Т по МСЖД 811-1, или 25CrMo4 по DIN EN 10083-3 (термообработанная улучшенная сталь);
- А5Т по МСЖД 811-1, или 42CrMo4 по DIN EN 10083-3 (термообработанная улучшенная сталь);
- 34CrNiMo6 + QT по DIN EN 10083-3 (термообработанная улучшенная сталь).

Не менее важной целью задуманного научно-исследовательского проекта было создание надежных рамочных условий для промышленности и контролирующих органов применительно к дальнейшему совершенствованию регулирующих механизмов типа европейских стандартов, поскольку проекты стандартов EN 13103 и EN 13104 вообще не содержали показателей прочности для уже применявшихся сталей А4Т, А5Т или 34CrNiMo6+QT.

Новый научно-исследовательский проект был инициирован и финансировался Союзом предприятий железнодорожной промышленности и железными дорогами Германии (DB). Этот проект был выполнен Институтом машинных технологий и эксплуатационной надежности Технического университета г. Клаусхайль-Целлерфельд в 2004 г.

Анализ результатов, полученных в ходе реализации проекта, выявил факты неизвестного ранее поведения осей колесных пар из стали А5Т. Так, было выявлено, что величина реально допустимых напряжений оказалась ниже тех, которые следовало ожидать, основываясь на результатах статических испытаний. Этот результат был получен на базе усталостных

испытаний реальных осей колесных пар на растяжение.

Компания DB Systemtechnik (Бранденбург-Кирхмёзер), входящая в состав холдинга железных дорог Германии, в 2005 г. выполнила дополнительные исследования на образцах из стали А5Т. Их результаты позволили предположить, что причиной необычного поведения стали был характер термообработки.

В ноябре 2006 г. союз VDB поручил агентству BAM следующий научно-исследовательский проект. В его рамках исследовали образцы, рассматривавшиеся в предыдущем проекте, а также (для сравнения) изготовленные из стали А5Т оси колесных пар электропоездов серии 481 городской железной дороги Берлина, серии 474 городской железной дороги Гамбурга и дизель-поезда серии 612 DB.

В указанном проекте сталь А5Т изучали на предмет выявления зависимостей между состоянием микроструктуры, результатами неразрушающих испытаний и эксплуатационной прочностью. Исследования BAM включали:

- дополнительные фрактографические испытания образцов осей колесных пар, позволяющие изучить характер излома;
- химический анализ и измерение твердости на образцах, вырезанных из осей колесных пар;
- металлографические и неразрушающие испытания;
- сравнение микроструктуры различных образцов с целью обнаружения различий;

- определение статической и усталостной прочности (предела выносливости) материала образцов при предельном числе циклов нагружения 10^7 (испытания на растяжение и круговой изгиб малых образцов).

Работы по проекту, начатые в декабре 2006 г., завершились в марте 2008 г.

Механико-технологические испытания

Важной целью механико-технологических испытаний было установление зависимости между микроструктурой стали и механическими свойствами. Это требовалось для того, чтобы прояснить проблему несоответствия между реальной эксплуатационной прочностью и прогнозируемой на базе статических испытаний.

Методика предусматривала отбор образцов для испытаний микроструктуры в состоянии поставки и после различных видов термообработки.

Программа испытаний. На малых образцах, вырезанных из осей колесных пар, определяли при комнатной температуре следующие механические показатели:

- прочность при растяжении, условный предел текучести, относительные удлинение и сужение при разрыве в испытаниях на растяжение;
- работу разрушения образца с надрезом по стандарту ISO-V в испытаниях на ударную вязкость при изгибе;

- предел выносливости на гладких (без надреза) образцах в испытаниях на круговой изгиб;

- пороговое значение интенсивности циклических напряжений в испытаниях на рост трещин.

Параллельно проводились измерения твердости, которые, однако, давали мало информации о взаимосвязи между структурой и механическими свойствами, и исследовался химический состав образцов.

Агентство BAM имело в распоряжении реальные оси колесных пар различных моторвагонных поездов и образцы осей в масштабе 1:1 для испытаний на круговой изгиб. Из колесных пар поездов серий 481 и 474 брали для испытаний целые оси, а поездов серии 612 — только фрагменты осей. Все исследованные оси были изготовлены и термообработаны в период с 1997 по 2000 г. Рассматривались также фрагменты осей из предыдущего исследовательского проекта, представлявшие собой подступичную часть (тип РС), и отрезки осей со свободной поверхностью (тип ОС). Все образцы не имели ни изломов, ни трещин, к ним прилагались свидетельства с результатами приемочных испытаний, из которых можно было получить механико-технологические показатели образцов одной плавки и одной партии термообработки. Дополнительно образцы типов РС и ОС имели свидетельство о результатах отпуска, а также о механических показателях каждой из осей.

Сравнение механико-технологических свойств находившихся в эксплуатации осей колесных пар типов ОС и РС показало большую вариативность результатов даже между деталями одной плавки и с одинаковой термообработкой.

Термообработка. Одну из осей с обозначением 481-02 выбрали в качестве эталонного образца (рис. 1). Отдельные части ее были термообработаны разными способами для получения заданных состояний

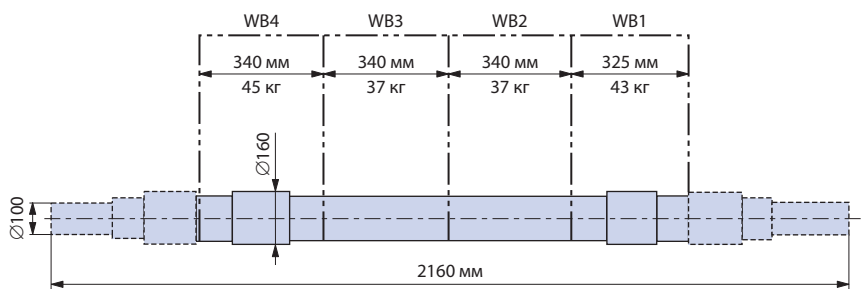


Рис. 1. Расположение зон различных видов термообработки на эталонной оси 481-02

Таблица 1

Результаты испытаний на растяжение эталонной оси в исходном состоянии и ее термообработанных участков

| Испытываемый объект | $R_{p0,2}$, МПа | R_m , МПа | A, % | Z, % |
|--------------------------|------------------|-------------|------|------|
| Ось в исходном состоянии | 643 | 805 | 21,5 | 68 |
| WB1 | 563 | 740 | 18,5 | 70 |
| WB2 | 547 | 722 | 24,5 | 71 |
| WB3 | 746 | 908 | 19,5 | 66 |
| WB4 | 791 | 937 | 16,9 | 63 |

микроструктуры и механических свойств. Предварительно были подвергнуты термообработке малые образцы, чтобы оценить получаемые микроструктуры, обусловленные варьруемыми параметрами закалки и отпуска. Малые образцы и фрагменты осей колесных пар подвергались термообработке в термическом цехе.

На основе результатов стандартной термообработки четыре зоны эталонной оси 481-02 подвергали повторному улучшению. Проведенные на малых образцах эксперименты показали, что повторное улучшение уже улучшенного материала дает приемлемые результаты. Отдельные участки эталонной оси имели обозначения WB1, WB2, WB3 и WB4 (см. рис. 1). Параметры термообработки (температура и время) выбирались с учетом значений допусков, предоставленных изготовителем колесных пар.

Результаты исследований

Металлографические исследования. На всех шлифах из осей колесных пар поездов серий 474, 481 и 612, а также из образцов осей, изготовленных в масштабе 1:1, как и ожидалось, установлена микроструктура высокого отпуска с включениями перлита. При этом остаточный аустенит не обнаружен.

Различия в микроструктуре отдельных образцов оказались слишком незначительными, чтобы их можно было обнаружить визуально, поэтому было невозможно найти различия механических свойств, зависящие от микроструктуры. В связи с этим структура всех участков эталонной оси от WB1 до WB4 выглядит равномерной и не имеет никаких необычных неоднородностей.

Фрактографические исследования. Все полученные при механических испытаниях поверхности излома были исследованы, по крайней мере визуально. Образцы, вырезанные

из зон WB2 и WB4, имеют типичный для такого материала так называемый фрезерный излом.

Фрактографическим исследованиям подвергались также образцы в масштабе 1:1, которые испытывали на круговой изгиб. Оба образца показали ожидавшуюся от них прочность. При дальнейших исследованиях с помощью вихрекового метода установили, что оба образца имеют по несколько трещин с очень похожей общей картиной. В связи с этим из материала, располагавшегося между трещинами, были вырезаны образцы для дополнительных исследований. Это позволило исключить влияние на прочность имевшихся в первоначальных образцах трещин.

Зоны выхода трещин были изучены визуально с помощью стереомикроскопа и растрового электронного микроскопа. На обоих образцах не обнаружены неоднородности поверхностей оси, которые могли бы инициировать образование трещин.

Результаты испытаний на растяжение. Чтобы выявить зависимость между термообработкой зон WB1 – WB4 и их механическими свойствами, из них вблизи от поверхности вырезали образцы для испытаний на растяжение по стандарту DIN 50125. При их проведении определяли условный предел текучести $R_{p0,2}$, прочность на растяжение R_m , относительное удлинение при разрыве A и относительное сужение при разрыве Z. Образцы

имели форму, соответствующую стандарту DIN 50125.

Результаты испытаний на растяжение термообработанных образцов WB1 – WB4 и эталонной оси в исходном состоянии представлены в табл. 1.

Результаты испытаний на ударный изгиб образцов с надрезом. В рамках научно-исследовательского проекта были проведены испытания на ударный изгиб по DIN EN 10045-1 образцов с U-образным (ISO-U) и V-образным (ISO-V) надрезами. Эти образцы вырезали из наружных зон осей.

Величина работы разрушения образцов с V-образным надрезом из-за геометрии надреза в большей степени зависит от различий в микроструктуре, обусловленных термообработкой, чем образцов с U-образным надрезом. В рамках предыдущего проекта (BMBF) испытывались образцы только с U-образным надрезом.

Испытания на ударный изгиб образцов WB1 – WB4, вырезанных из эталонной оси 481-02, проводились как в состоянии поставки, так и после термообработки. Результаты испытаний представлены в табл. 2, из которой видно, что интервал значений для образцов ISO-V больше, чем для ISO-U, что говорит о больших различиях механических свойств, обусловленных термообработкой и, соответственно, микроструктурой.

Результаты испытаний на круговой изгиб. Испытания на круговой

Таблица 2

Результаты испытаний на ударный изгиб образцов с надрезом

| Образец | Работа разрушения A_r , Дж | | | | |
|---------|------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | Исходное состояние | WB1 | WB2 | WB3 | WB4 |
| ISO-V | 114 | 157 | 154 | 76 | 60 |
| ISO-U | 56 | 71 | 71 | 49 | 53 |

изгиб с целью определения усталостной прочности проводились на гладких образцах при частоте приложения нагрузки 71,5 Гц в соответствии со стандартом DIN 50113. Применявшиеся образцы имели такую же геометрию и шероховатость, как и в предыдущем проекте ВМВФ. Их вырезали из наружной области фрагмента оси, как и образцы для испытаний на растяжение.

Результаты оценивались с помощью метода ступеней по Хьюкку. Для каждой переходной области испытывали не менее 18 образцов,

после чего проводилась заключительная расчетная оценка. Последняя давала средние величины и стандартные отклонения значений предела выносливости, а также доверительный интервал. Результаты испытаний представлены в табл. 3, а также в графическом виде на рис. 2, на котором слева дана эталонная ось 481-02 в исходном состоянии.

Остальные результаты распределены по возрастанию предела выносливости. Для сравнения на графике показано значение для

Таблица 3

Результаты испытаний на круговой изгиб

| Объект испытаний/образец | Усталостная прочность $S_{D50\%}$, МПа | Интервал разброса значений $S_{D50\%}$ |
|-------------------------------|---|--|
| OC65 (исходное состояние) | 463 | 1,37 |
| 481 – 02 (исходное состояние) | 479 | 1,13 |
| WB1 | 417 | 1,15 |
| WB2 | 365 | 1,37 |
| WB3 | 513 | 1,14 |
| WB4 | 469 | 1,13 |

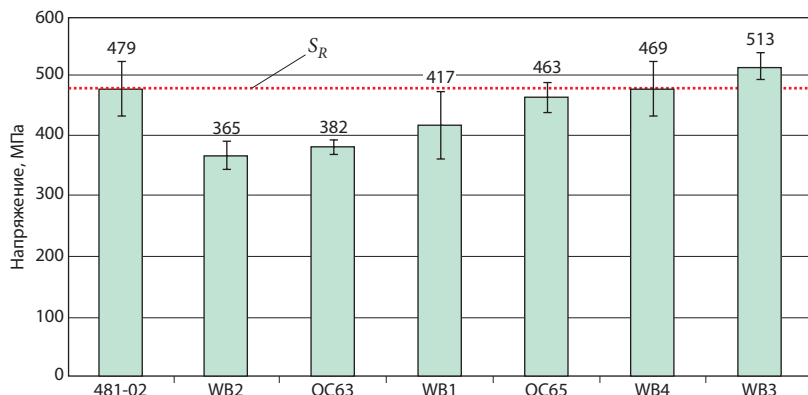


Рис. 2. Сравнение результатов испытаний на круговой изгиб, выполненных на образцах: S_R – линия напряжений эталонной оси в исходном состоянии; OC63 и OC65 – образцы, вырезанные на открытой части оси

образца OC63, вырезанного из открытой части оси (проект ВМВФ).

Испытания на рост трещин. Найденное в результате этих испытаний пороговое значение циклической интенсивности напряжений зависит от обусловленной термообработкой микроструктуры. В испытаниях на рост трещин для соотношения напряжений $R = 0,1$ (отношение низшего напряжения к вышшему) должны были определять пороговые значения циклической интенсивности ΔK_{th} , а также параметры C и m стабильной фазы роста трещин. На рис. 3 показана схема вырезки образцов для испытаний на ударный изгиб (КР) и рост трещин (РР).

Процесс испытания согласно стандарту BS ISO 12108 реализован с использованием компьютерного управления, с помощью которого регулировалась величина прикладываемой силы, причем величина силы изменялась во времени по синусоидальному закону. Специальные образцы типа SENB3 испытывали в электромагнитном резонансном пульсаторе с номинальным усилием 20 кН. Длину трещин определяли косвенно путем измерения разности потенциалов между краями надреза, а усталостные трещины измеряли с помощью цифрового нановольметра.

Пороговое значение ΔK_{th} определялось при постоянном значении соотношения $R = 0,1$ и непрерывно снижающейся нагрузке ΔF . Испытания прерывали в том случае, когда достигалась минимальная скорость роста трещин 0,01 нм/цикл или когда после заданного числа циклов не обнаруживался рост трещин. Определенные по испытаниям на рост трещин пороговые значения обобщены в табл. 4.

Выводы

Детали ходовой части железнодорожного подвижного состава являются наиболее важными с точки

Таблица 4

Пороговые значения при испытаниях на рост трещин

| Испытываемый объект и тип термообработки | Пороговое значение ΔK_{th} , МПа·м ^{0,5} | Экстремальные величины порогового значения в сериях | |
|--|---|---|--------------|
| | | минимальное | максимальное |
| 481-02, исходное состояние | 6,52 | 6,16 | 6,9 |
| WB4 | 6,45 | 6,02 | 6,67 |
| WB3 | 6,22 | 6,11 | 6,4 |
| WB2 | 6,14 | 5,89 | 6,3 |
| WB1 | 6,06 | 5,87 | 6,27 |

зрения безопасности и требуют, как уже отмечалось, тщательного назначения размеров, точного конструирования и изготовления, регулярного технического обслуживания, своевременного получения допуска к эксплуатации, контроля изготовления и приемки. Часто эти требования находятся в конфликте с экономическими факторами, но надежность и безопасность не допускают компромиссов: в случае отказа этих деталей опасность угрожает здоровью и жизни людей и влечет за собой материальный ущерб.

Вследствие быстрого прогресса состояния техники, особенно в отношении назначения размеров деталей, предела выносливости и эксплуатационной прочности с помощью вычислительных средств, стандарты редко отражают или вообще не отражают этот прогресс. В связи с этим встал вопрос об экспериментальных исследованиях в области прочности, механики разрушений и технологической обработки высококачественных материалов. Определение границ их применения при само собой разумеющемся консервативном подходе к безопасности в настоящее время очень важно, так как в отношении осей колесных

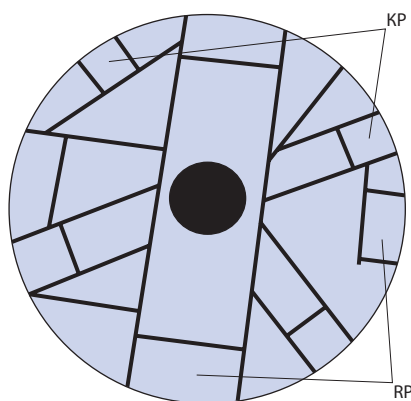


Рис. 3. Схема вырезки образцов для испытаний на ударный изгиб и рост трещин

пар наблюдается тенденция к замене улучшенных сталей нормально отожженными.

Как показали рассмотренные научно-исследовательские проекты, с

помощью термообработки улучшенных сталей можно добиться высоких показателей прочности. Конечно, при этом не следует снижать ударной вязкости в жестких условиях железнодорожной эксплуатации. Для того чтобы и в будущем железные дороги оставались самым надежным видом транспорта, необходимы фундаментальные исследования во всех областях железнодорожной техники.

По материалам Федеральной службы испытаний материалов и исследований (www.bam.de), Союза предприятий железнодорожной промышленности в Германии (www.bahnindustrie.info) и компании Radsatzfabrik Ilsenburg (www.rafil-gmbh.de).

Редакция журнала

«Железные дороги мира»

**приглашает на внештатную работу переводчиков с английского, немецкого и французского языков, имеющих опыт работы на железнодорожном транспорте и проживающих в Москве или Московской области.
Обращаться по телефону (499) 317-55-65 или по электронной почте zdm@css-rzd.ru.**