

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛЕЙ ДЛЯ АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИЯ

И. Родионова, Г. Филиппов

Внедрение современных технологий производства сталей для автомобилестроения является необходимым условием обеспечения конкурентоспособности отечественных конструкционных сталей. Такие технологии должны разрабатываться с учетом мировых тенденций развития данного класса материалов. Но при этом следует искать собственные пути решения проблем, возникающих у отечественных потребителей автомобилестроительных сталей, учитывать особенности оборудования российских металлургических предприятий.

Одним из основных направлений развития материалов для кузова и других деталей автомобиля является увеличение объема применения высокопрочных сталей с целью повышения безопасности и снижения массы автомобиля. Необходимость снижения массы диктуется постоянным ужесточением экологических требований по уменьшению вредных веществ в выхлопе автомобиля.

В настоящее время крупнейшие металлургические компании, производящие автолистовую сталь, совместно с основными российскими производителями автомобилей работают над созданием сталей с улучшенными потребительскими свойствами. Среди наиболее важных направлений можно отметить следующие:

- высокоштампуемый прокат из стали со сверхнизким содержанием углерода;
- стали повышенной прочности;
- повышение коррозионной стойкости автолиста путем освоения производства сталей с цин-

ковым, железцинковым и алюмокремниевым покрытиями разного класса прочности и назначения, а также за счет оптимизации химического состава и технологии производства самих автолистовых сталей.

Применение вакууматоров, позволяющих получать стали со сверхнизким содержанием углерода, в конвертерном производстве основных металлургических предприятий, производящих автолистовые стали (ОАО «НЛМК», ОАО «ММК», ОАО «Северсталь»), открывает новые возможности для производства как высокоштампуемых сверхнизкоуглеродистых сталей, так и сталей повышенной прочности различных классов в холоднокатаном и покрытом вариантах, а также холоднокатаных сталей повышенной коррозионной стойкости.

ВЫСОКОШТАМПУЕМЫЕ IF-СТАЛИ

Говоря о первом направлении работ, касающемся обеспечения высокой штампуемости, можно отметить, что сегодня на российских металлургических комбинатах практически освоено производство высокоштампуемого автолистового проката из стали типа IF в холоднокатаном состоянии и с цинковым покрытием.

Типовой химический состав выпускаемой в настоящее время стали IF, используемой для производства холоднокатаного листа и листа с покрытиями, представлен в табл. 1.

Содержание титана и ниобия для стали, микролегированной по одному из вариантов — титаном либо титаном совместно с ниобием — рассчиты-

Табл. 1

Типовой состав стали IF, %						
C	Si	Mn	S	P	Al	N
0,003–0,005	0,010–0,030	0,10–0,20	0,005–0,010	0,008–0,015	0,02–0,05	0,004–0,006

вается в зависимости от номинального содержания углерода, серы и азота методами термодинамического анализа и составляет, соответственно 0,03–0,06 % титана или, соответственно, 0,02–0,03 % титана и 0,03–0,06 % ниобия.

Значения технологических параметров производства для конкретных плавок первоначально назначались на основе мирового опыта производства аналогичных сталей. В настоящее время при разработке технологии производства автолистовых сталей все более широко применяются методы термодинамического анализа, которые позволяют для сталей конкретного химического состава определить температурные интервалы выделения и растворения соединений, влияющих на свойства металлопродукции. В соответствии с этим назначаются режимы нагрева под прокатку, конца горячей прокатки и смотки, а также режимы отжига.

Иногда требуется решение обратной задачи: исходя из особенностей оборудования конкретного металлургического предприятия, в частности из возможностей обеспечения определенных режимов непрерывного отжига, выплавлять сталь оптимального химического состава, который даст наиболее высокий уровень качества.

Например, для высокоштампуемых IF-сталей, в зависимости от химического состава, оптимальные температуры непрерывного отжига могут существенно различаться. Для сталей, микролегированных только титаном, при определенном химическом составе повышение температур непрерывного отжига выше 800 °С может приводить к растворению частиц карбида титана, переходу углерода в твердый раствор и ухудшению штампуемости. Для сталей, микролегированных титаном совместно с ниобием, можно выбрать химический состав таким образом, что растворение частиц карбида ниобия вплоть до температур 850 °С будет невозможно. В этом случае непрерывный отжиг при 850 °С обеспечит наиболее высокие показатели штампуемости.

В данной статье конкретные значения температур нагрева слябов под прокатку, конца горячей прокатки и смотки, а также оптимальные параметры отжига (колпакового или непрерывного) не приводятся, так как в зависимости от химического состава стали и возможностей каждого металлургического предприятия эти параметры будут различаться. Авторы преследовали более общую цель: показать принципиальный подход к выбору оптимальных технологических параметров.

АВТОЛИСТОВЫЕ СТАЛИ ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ

При рассмотрении второго направления работ, связанного с освоением производства автолистовых сталей повышенной прочности, мы исходим из того, что важнейшими характеристиками таких сталей являются временное сопротивление разрыву σ_b или предел текучести σ_p , а также коэффициент нормальной пластической анизотропии r_m . Сочетание этих показателей определяет комплекс основных свойств таких сталей — прочность и штампуемость. На рис. 1 приведены значения указанных характеристик для различных типов сталей.

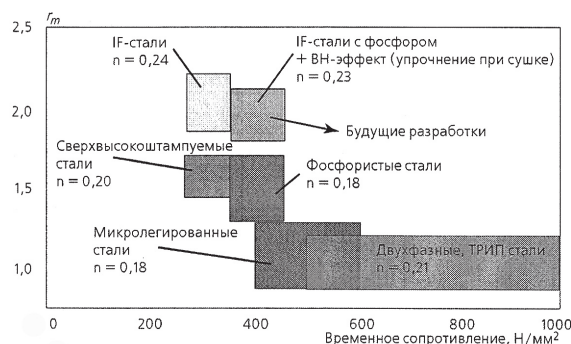


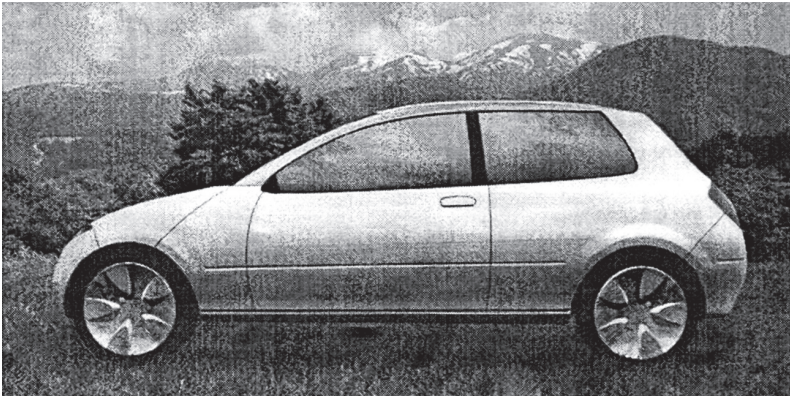
Рис. 1. Прочность и штампуемость листа из различных типов сталей

Использование различных механизмов упрочнения (твердорастворного, упрочнения дисперсными частицами, упрочнения в результате измельчения зерна, упрочнения второй структурной составляющей) позволяет получать различные сочетания прочности и штампуемости. В частности, использование твердорастворного упрочнения элементами замещения и упрочнения измельчением зерна в IF-сталях позволяет получать существенно более высокий уровень пластических свойств, включая сохранение острой текстуры, по сравнению с обычными низкоуглеродистыми сталями повышенной прочности. Из рис. 1 видно, что только упрочненные IF-стали позволяют сохранять очень высокий уровень коэффициента r_m : 1,6–1,7 при прочности $\sigma_b = 400$ Н/мм².

Объем применения сталей повышенной прочности в мировом автомобилестроении непрерывно растет. За период 1992–2001 гг. его прирост составил 43 % (с 115 кг/авт. до 165 кг/авт.).

СТАЛИ С ВН-ЭФФЕКТОМ

На российских металлургических предприятиях начаты работы по выпуску сверхнизкоугле-



родистых сталей с ВН-эффектом (*bake hardening*) различных классов прочности (от -180 до 260). Физическая сущность ВН-эффекта заключается в закреплении дислокаций, появляющихся в стали после штамповки детали, атомами углерода, подвижность которых в твердом растворе феррита резко увеличивается при повышенной температуре. Это приводит к упрочнению штампованных деталей во время сушки лакокрасочного покрытия при температуре $150\text{--}200$ °С. Для этих целей также можно использовать сверхнизкоуглеродистые стали, микролегированные титаном совместно с ниобием, либо только ниобием.

При этом содержание микролегирующих элементов по отношению к элементам внедрения и технологические параметры производства должны обеспечивать содержание углерода в твердом растворе в количестве $6\text{--}20$ ppm, что необходимо для обеспечения ВН-эффекта.

Важным резервом обеспечения требуемых свойств IF-сталей и особенно сверхнизкоуглеродистых сталей с ВН-эффектом является соблюдение определенных соотношений между элементами, участвующими в связывании примесей внедрения в прочные соединения, к которым относятся не только титан и ниобий, но и алюминий.

Для сталей с ВН-эффектом необходимо, на наш взгляд, обеспечить выполнение двух условий: связывание углерода только в карбид ниобия (в определенном количестве) и предупреждение возможности связывания углерода в другие частицы, в частности в карбид титана. То есть содержание ниобия рассчитывается только в зависимости от содержания углерода, а содержание титана и алюминия — в зависимости от содержания азота. Задавая определенное соотношение между содержанием титана, алюминия и азота, можно влиять и на чистоту твердого раствора по примесям внедрения на разных стадиях производства, и на характеристики зеренной структуры, и на текстуру,

что в конечном итоге определяет комплекс свойств сверхнизкоуглеродистых сталей.

Например, при недостаточном для полного связывания азота содержании титана возможно с использованием различных температурных условий конца горячей прокатки и смотки либо обеспечить, либо подавить связывание оставшегося азота в нитрид алюминия. Сохранение азота в твердом растворе перед отжигом является также

одним из способов повлиять на конечный уровень свойств — аналогично влиянию выделения нитрида алюминия на начальных стадиях рекристаллизации низкоуглеродистой стали типа 08Ю, существенно улучшающему характеристики микроструктуры, текстуры и штампуемости стали.

Для расчета температурных интервалов выделения частиц, например, нитрида титана, а также остаточного содержания алюминия и азота в твердом растворе использование методов термодинамического анализа обязательно, но для низких температур этого недостаточно: тут нужны сведения о кинетических параметрах процесса, которые могут быть получены в результате исследований состояния твердого раствора методом внутреннего трения. Это направление исследований мы считаем весьма перспективным для повышения уровня и стабильности комплекса свойств сталей с ВН-эффектом.

Легирование только ниобием обеспечивает более высокий уровень прочности, хотя при этом несколько снижаются показатели штампуемости. Это связано с тем, что при легировании только ниобием связывание азота осуществляется алюминием с образованием нитрида, частицы которого имеют малые размеры и не позволяют обеспечить формирования достаточно крупного ферритного зерна. При совместном легировании титаном и ниобием большая часть азота связывается в нитрид титана, частицы которого, размерами до 3 мкм, не оказывают влияния на размер зерна феррита. То есть в зависимости от конкретных требований к прочности и штампуемости может быть использован тот или другой вариант.

В отличие от IF-стали, использовать вариант микролегирования только титаном в случае стали с ВН-эффектом, по нашему мнению, нецелесообразно. В этом случае, помимо связывания азота в нитрид титана и образования карбида титана, возможно образование сульфида или карбосуль-

фида титана, что зависит от содержания других элементов в стали, а также от технологических пара метров производства. Поэтому такой вариант легирования не позволяет точно контролировать содержание углерода в твердом растворе, а следовательно, гарантировать определенную величину ВН-эффекта.

В ОАО «ММК» выпущена и поставлена в ОАО «АвтоВАЗ» первая партия горячеоцинкованного проката толщиной 0,8 мм с ВН-эффектом из сверхнизкоуглеродистой стали, микролегированной титаном, ниобием и алюминием, класса прочности 180.

Фактические значения параметров этого материала таковы: предел текучести 190–195 Н/мм², предел прочности 300–310 Н/мм², относительное удлинение 40–45 %, коэффициент нормальной пластической анизотропии $r_m \geq 2,2$ при величине ВН-эффекта 40 Н/мм².

В настоящее время работы по освоению сталей с ВН-эффектом продолжают в направлении повышения класса прочности выпускаемых сталей и величины ВН-эффекта. Основные пути достижения этой цели — оптимизация температурно-временных параметров горячей прокатки, смотки и отжига, а также дополнительное легирование стали, в частности фосфором и другими элементами.

В ближайшее время предполагается освоение производства высокопрочных IF-сталей различных уровней прочности (без ВН-эффекта), легированных фосфором, марганцем, кремнием и бором с тремя вариантами микролегирования: Ti, Ti + Nb и Nb.

Несмотря на то, что вопрос выбора системы микролегирования достаточно широко обсуждался, авторы хотели бы обозначить свои позиции в этом вопросе. Хотя вариант микролегирования только титаном является приемлемым, другие варианты микролегирования более предпочтительны. Присутствие ниобия в таких сталях является обязательным. Во-первых, в этом случае комплекс свойств стали более стабилен; во-вторых, существует возможность использования механизма упрочнения, связанного с измельчением зерна. Что касает-

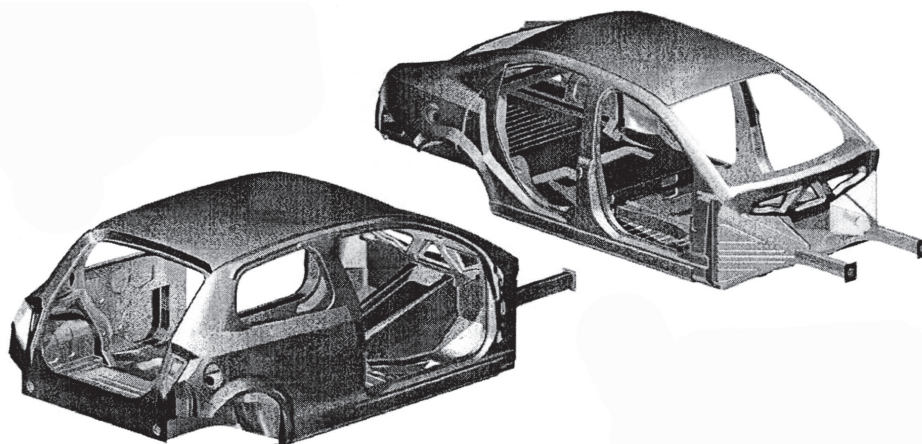
ся использования твердорастворного упрочнения элементами замещения, то здесь в соответствии с результатами большинства исследований предпочтение отдается фосфору и в некоторой степени марганцу. Не следует упускать из вида и необходимость микролегирования стали бором, чтобы избежать охрупчивания границ зерен в присутствии фосфора.

АВТОЛИСТОВЫЕ СТАЛИ ПОВЫШЕННОЙ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ

Пожалуй, одной из наиболее важных проблем на сегодняшний день является повышение коррозионной стойкости автомобиля. О том, как эта проблема решается путем использования автолистовых сталей с покрытиями (Zn, Al–Si), сказано достаточно много. Имеет смысл остановиться на путях повышения коррозионной стойкости самих автолистовых сталей путем оптимизации их химического состава и технологии производства.

До недавнего времени считалось, что, во-первых, коррозионная стойкость автолистовых низкоуглеродистых и низколегированных сталей различается незначительно, и во-вторых, невозможно существенно повлиять на нее, изменяя химический состав стали, чистоту по неметаллическим включениям, технологические параметры производства. Поэтому единственным направлением борьбы с коррозией было принято считать нанесение защитных покрытий — использование оцинкованных сталей, повышение качества лакокрасочного покрытия и т. д.

В то же время, принимая во внимание мнение представителей автомобильных заводов, а также анализируя опыт эксплуатации различных отечественных и зарубежных автомобилей, можно сделать вывод о различной коррозионной стойкости самих автолистовых сталей в зависимости от



марки, завода-производителя и технологических параметров производства.

Поэтому основная цель дальнейшей работы — установление факторов, определяющих коррозионную стойкость автолистовых сталей, разработка рекомендаций по повышению коррозионной стойкости, а в перспективе — внесение в нормативно-техническую документацию на автолистовые стали требований к коррозионной стойкости, учитывающих не только качество нанесения покрытия, но и коррозионную стойкость самой стали, в частности гарантии отсутствия косметической и перфорирующей коррозии в течение определенных периодов эксплуатации.

При постановке задачи важным моментом является выбор методов испытаний. Применение большинства существующих методов (по DIN 51021 в термовлагодоме, камере соляного тумана и др.) позволяет хорошо оценить качество нанесения покрытий или консервационно-технологической смазки, однако не позволяет дифференцировать сами стали по их коррозионной стойкости, прогнозировать срок их эксплуатации без коррозионных повреждений.

Поэтому одной из основных задач первого этапа исследований является проведение испытаний образцов с заведомо различающейся коррозионной стойкостью по известным методикам, а также по новым методикам, разработанным в ЦНИИчермет им. И.П. Бардина в процессе предварительных исследований. По результатам такой работы должно быть принято решение о выборе методов испытаний для проведения дальнейших работ и для внесения в НТД.

Для проведения предварительных коррозионных испытаний сталей разных марок и разных заводов-поставщиков был выбран метод переменного погружения образцов в водный раствор 3,5 % NaCl в соответствии со стандартом ASTM G 44-75. Коррозионную стойкость оценивали по приросту массы образца (привесу) на единицу площади его поверхности. По результатам испытаний получена зависимость скорости коррозии от суммарного содержания углерода и кремния, а в некоторой степени и алюминия.

Учитывая положительное влияние на коррозионную стойкость пониженного содержания углерода и кремния, освоение производства сталей типа IF и других сталей с низким содержанием углерода следует проводить, оценивая влияние содержания всех легирующих элементов на коррозию, и оптимизировать состав стали с точки зрения обеспечения наиболее высокой коррози-

онной стойкости. Возможно, что именно на базе таких сталей можно обеспечить не только высокую штампуемость, но и коррозионную стойкость производимого автолиста. Как показано на рис. 2, средние значения скорости потери массы в результате атмосферной коррозии для сверхнизкоуглеродистых сталей примерно в 2–3 раза ниже, чем для обычных низкоуглеродистых сталей.

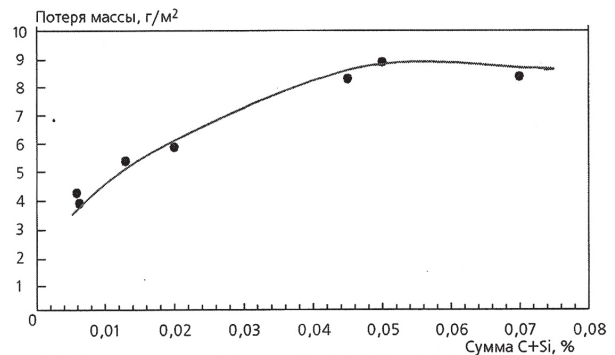


Рис. 2. Зависимость потери массы от суммы содержания C+Si

Помимо влияния на коррозионную стойкость суммарного содержания углерода и кремния, установлено также положительное влияние легирования стали медью и некоторыми другими элементами. В связи с этим специалисты ОАО «Северсталь» и ОАО «ГАЗ» проводят исследования в направлении создания холоднокатаного автолистового проката из сталей, легированных медью. Аналогичные исследования по созданию сталей, в частности IF, легированных медью, проводятся в Японии.

Помимо оптимизации химического состава, следует отдельно решить вопрос обеспечения чистоты автолистовой стали по неметаллическим включениям, также влияющим на ее коррозионную стойкость. В процессе исследований, проведенных в ЦНИИчермет, установлено, что коррозионная стойкость углеродистых и низколегированных сталей существенно снижается в присутствии особого типа неметаллических включений, которые условно назвали КАНВ (коррозионно-активные неметаллические включения). Эти включения, как правило, содержат кальций и вносятся в сталь в процессе внепечной обработки с участием высокоосновного шлака при определенных технологических параметрах.

КАНВ не выявляются традиционными методами, предусмотренными нормативно-технической документацией на стали — балльной оценкой неметаллических включений на нетравленном шли-

фе в оптическом микроскопе. Дело в том, что большая часть таких включений имеют светлую окраску и очень маленький размер — не более 1–2 мкм. Поэтому первая задача, которую решали в основном специалисты НИФХИ им. Л.Я. Карпова и Северстали, с привлечением ЦНИИчермет, — это разработка экспресс-методов выявления КАНВ. В результате были разработаны и запатентованы методы оценки качества стали, заключающиеся в обработке поверхности металлографического шлифа специальными реактивами, в результате которой КАНВ приобретают характерный вид, как представлено на рис. 3. Наличие таких включений и/или их количественная оценка и характеризуют коррозионную стойкость стали.

Следует особо подчеркнуть, что речь идет об особых включениях: их количество, как правило, никак не коррелирует с содержанием других включений, которые обычно оцениваются при производстве стального проката. Сталь может быть очень чистой по обычным включениям, но корродировать с очень большой скоростью из-за наличия КАНВ. И наоборот, в стали могут присутствовать обычные включения вплоть до 4 баллов (оксиды, силикаты), но при этом отсутствовать КАНВ, и тогда оборудование будет работать долго. Именно КАНВ определяют стойкость стали против локальной коррозии в водных хлорсодержащих средах, в условиях атмосферного воздействия и в ряде других сред.

Теперь несколько слов о КАНВ в автолистовых сталях. В ЦНИИчермет были исследованы пятна коррозии, выявленные в ОАО «АвтоВАЗ» в прошлом году на автолистовых сталях 08Ю, 08ГСЮФ. Установлено, что участки, где произошло образование указанных пятен, содержат коррозионно-активные неметаллические включения, которые и приводят к интенсивному протеканию коррозионных процессов даже после непродолжительного контакта с влажной атмосферой или другой агрессивной средой (рис. 4). Проблема предотвращения коррозии должна решаться на этапе разработки технологии выплавки и внепечной обработки автолистовых сталей.

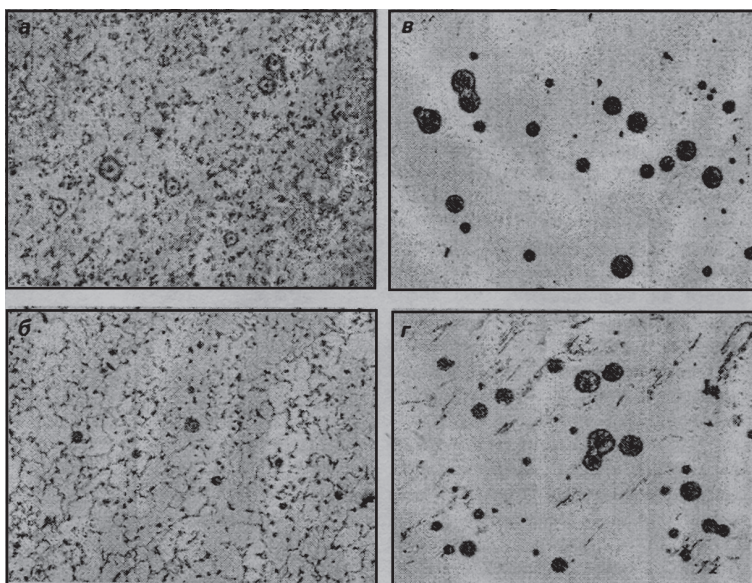


Рис. 3. КАНВ типа 1 (а, $\times 200$; б, $\times 100$) и типа 2 (в, г, $\times 100$) в образцах труб

Таким образом, повышение коррозионной стойкости сталей для автомобилестроения можно обеспечить путем оптимизации химического состава сталей, обеспечения чистоты по КАНВ и корректировки других технологических параметров производства. Эту работу следует проводить совместно со специалистами автомобильных заводов, которые могут предоставить конкретную информацию о коррозионном поведении используемых ими сталей.

Широкий спектр свойств, которыми отличаются сверхнизкоуглеродистые автолистовые стали, свидетельствует о возможности полного обеспечения потребностей отечественного автомобилестроения в высококачественной металлопродукции.

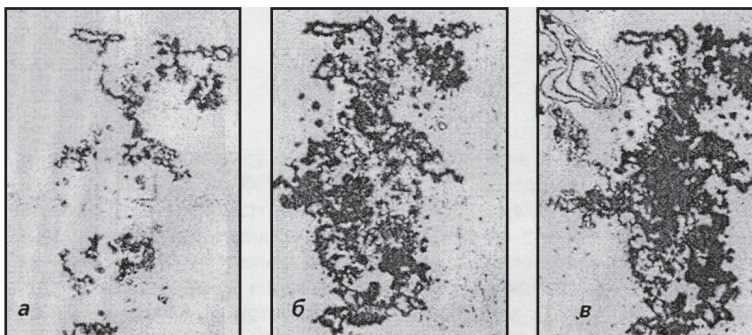


Рис. 4. Развитие коррозионного поражения на поверхности автолистовой холоднокатаной стали: а — выдержка менее 20 часов; б — выдержка 1 неделя; в — выдержка 2 недели, $\times 400$