



Решедько Владимир Васильевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» Сибирского государственного университета путей сообщения. Родился в 1945 г. В 1968 г. окончил факультет «Механизация сельского хозяйства» НСХИ. В 1977 г. окончил аспирантуру НЭТИ (НГТУ). С 1978 г. и по настоящее время работает на кафедре «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» СГУПС. Имеет более 70 печатных работ.

УДК 621.785

В.В. РЕШЕДЬКО

ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА В ТЕХНОЛОГИЯХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Рассмотрен способ изготовления и восстановления деталей из углеродистых сталей термопластической обработкой. Приведены результаты экспериментальных исследований на всех этапах обработки. Способ позволяет осуществлять формообразование с созданием высокого уровня показателей конструктивной прочности при изготовлении и восстановлении деталей.

Горячая пластическая обработка в процессах машиностроительного производства используется сравнительно давно. Все виды, связанные с горячей деформацией при формообразовании элементов и деталей: горячая ковка, осадка, штамповка, профильный прокат, — можно отнести к таким процессам. Горячая пластическая деформация в этом случае применяется при формообразовании с целью получения элементов с требуемой точностью по размерам, форме и расположению поверхностей.

Термопластическая обработка (ТПО) включает нагрев в область аустенита, горячую пластическую деформацию, выдержку горячедеформированного аустенита и последующее охлаждение с разной скоростью (обычно закалка и отпуск) при однократном нагреве заготовки или детали (рис. 1). После выдержки

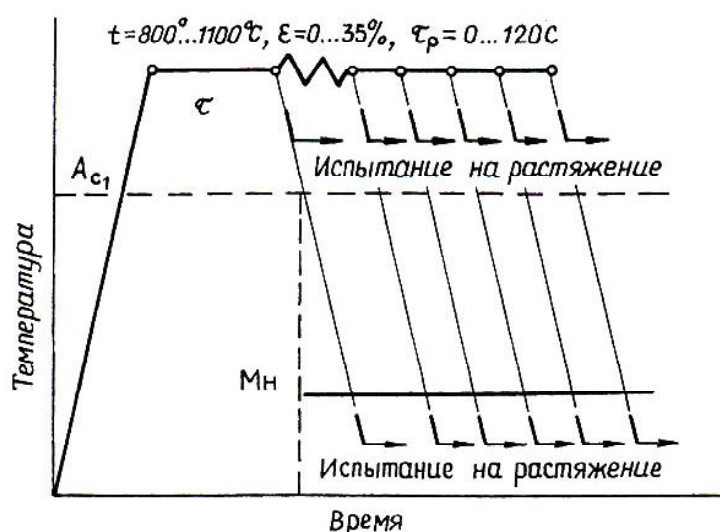


Рис. 1. Схема исследования ТПО

горячедеформированного аустенита возможна дополнительная деформация на 2–7 % с целью повышения плотности дислокаций. ТПО необходимо рассматривать как конечную стадию термического воздействия в технологическом процессе изготовления или восстановления деталей. После этого могут выполняться только операции механической обработки [1].

Принципиальное отличие ТПО от существующих технологических схем за-

лючается в том, что выполняемые операции «не разорваны» во времени. Режимы формообразования путем горячей деформации и последующей термической обработки являются взаимно определяющими и назначаются с учетом выполнения всего комплекса операций. Режимы каждой операции ТПО не могут быть назначены независимо друг от друга, как это наблюдается в большинстве существующих технологий формообразования и последующей термической обработки (ТО) [2].

Выбор оптимальных режимов ТПО производится с учетом химического состава материала, имеющегося технологического оборудования, требуемой конструктивной прочности и сводится к назначению температуры нагрева и деформации, степени и скорости деформирования, скорости охлаждения детали и др. В общем случае выбор режимов ТПО может быть выполнен по графикам горячего деформирования в истинных координатах [3].

Согласно дислокационной теории упрочнения металлических материалов повышение конструктивной прочности углеродистой стали может происходить несколькими путями [4]:

1) повышением плотности дислокаций и «закреплением» их атомами азота, углерода (атмосферы Сноэка, Котрелла и др.);

2) созданием препятствий перемещению дислокаций путем выделения субмикрочастиц упрочняющих фаз (карбидов, карбонитридов);

3) образованием в высокотемпературной области развитой полигонально-ячеистой структуры аустенита с последующим «наследованием» ее конечными структурами и получением высокого уровня показателей конструктивной прочности [4]. На современном этапе развития теории упрочнения сплавов данный путь является одним из наиболее перспективных.

Реализация упрочнения первым путем наблюдается после ТО. Это приводит к повышению прочности с одновременным снижением пластичности. ТО реализует частично и второй путь упрочнения. При этом механизме упрочнения происходит сравнительно легкое перемещение менее закрепленных дислокаций, снятие пиковых напряжений и тем самым уменьшение опасности образования и развития хрупких трещин.

При ТПО реализуются все механизмы упрочнения, но в большей степени — третий путь, который обеспечивает одновременно повышение прочности и пластичности [2].

Материалом исследований выбрана углеродистая конструкционная сталь марок: сталь 20, сталь 45, сталь 70 со стандартным химическим составом, а также сталь 70, микролегированная титаном (0,1 % по массе).

Схема ТПО (см. рис. 1) отличается от схемы ТО наличием дополнительной операции — горячей деформации перед закалкой. Температурные режимы нагрева образцов под закалку, деформацию и отпуск оставались во всех случаях идентичными и варьировались в одинаковых пределах. Интервал температур нагрева образцов составлял от 800 °С до 1100 °С через 50 °С. ТПО образцов проводилась на установке, представляющей собой прокатный двухвалковый стан ДУО-300. Прокатный стан позволяет проводить горячую прокатку образцов со степенью деформации до 50 % (по толщине листа) за один проход и со скоростью деформирования порядка $3 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$. После закалки сталь подвергалась отпуску в течение 60 мин. Температурные режимы отпуска варьировались от 200 °С до 450 °С через 50 °С.

Рекомендации по внедрению ТПО и технологических режимов были предложены после оценки показателей конструктивной прочности при статических и циклических нагрузках. Были выполнены испытания исследуемых образцов с целью определения механических свойств, вязкости разрушения, малоцикловой и контактной усталости. Для проведения испытаний было разработано новое и использовано стандартное оборудование. Виды испытаний образцов на конструктивную прочность представлены на рис. 2. Механические свойства при растяжении и изгибе определялись путем испытаний на стандартной испытательной машине ИМ-4Р и на созданном универсальном испытательном комплексе (УНИК-1-71), допускаемое усилие нагружения которых составляло 40 и 100 кН соответственно [4]. Сечение образцов при испытании на растяжение составляло в рабочей зоне $3 \times 3 \text{ мм}^2$. Относительное удлинение определялось на базовой длине 30 мм. Высокая жесткость вертикальной цепи растяжения УНИК-1-71 позволяла проводить испытания на вязкость разрушения по схеме «чистый изгиб» с использованием специального устройства.

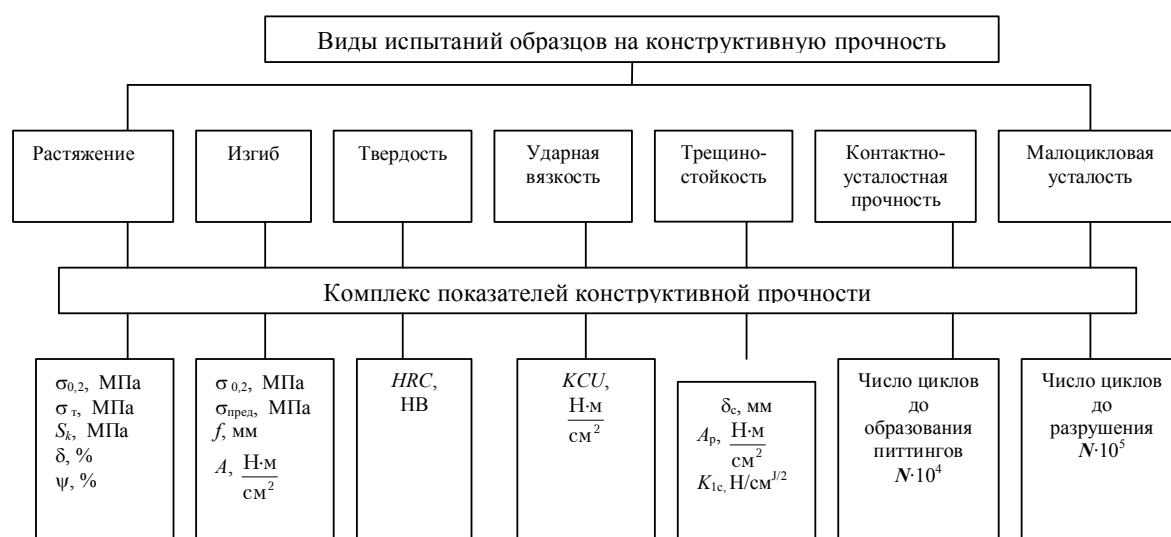


Рис. 2. Структурная схема видов испытаний углеродистых сталей на конструктивную прочность после ТО и ТПО

Оценка долговечности проводилась по результатам испытаний на малоцикловую и контактную усталость. Установка для испытания образцов на изгиб позволяла изменять амплитуды колебаний и осуществлять напряжения нагружения при любой асимметрии цикла. Частота колебаний оставалась постоянной и составляла 240 циклов в минуту. Разрушение образцов и количество циклов до разрушения каждого образца фиксировались автоматическими приборами [4].

Испытания на контактную усталость образцов с размерами $3 \times 14 \times 100 \text{ мм}$ после ТО и ТПО выполнены на установке, сконструированной на базе поперечно-строгального станка со встроенным нагружающим устройством.

Испытание проводилось при комнатной температуре методом обкатки со смазкой поверхности катания в идентичных условиях возвратно-поступательного и вращательного движения индентора из твердосплавного материала со скоростью 36 м/мин. Общее количество циклов до появления дефектов на

поверхности образца определялось как произведение двойных ходов суппорта станка (N) на время испытания, мин [4].

Структурные исследования образцов выполнены на микроскопах МИМ-8М, на растровом специализированном электронном микроскопе ICXA-50 и просвечивающем электронном микроскопе УМВ-100В. Исследование структуры горячедеформированного аустенита углеродистой стали выполнено в вакуумной камере с использованием микроскопа МВТ, увеличение которого составляло до 2000 крат. На растровом электронном микроскопе с помощью микрозонда выявлено распределение включений в матрице и определен их химический состав в зависимости от режимов ТО и ТПО. Для определения особенностей распада мартенсита после закалки углеродистой и микролегированной стали в процессе отпуска после ТПО использовался просвечивающий микроскоп. Увеличение микроскопа составляло $\times 50000$.

На модернизированной установке ИМАШ проведены исследования высокотемпературного состояния стали согласно схеме (см. рис. 1). Применительно к цели и задачам исследования был разработан новый метод: радиационный нагрев образца в вакууме с высокой точностью регулирования при температурах 800–1100 °С [5]. Для проведения экспериментов разработаны и изготовлены новые высокоточные системы: тиристорная система регулирования температуры нагрева и деформации с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$ во всем диапазоне исследуемых температур, системы измерения усилия (0...5 кН) и степени деформации ($\varepsilon = 2...35\%$). Наряду с этим были рассчитаны и изготовлены: устройство охлаждения образца медными ламелями в вакуумной камере со скоростью свыше 500 °С/с; электромагнитная муфта для быстрой нагрузки-разгрузки образца; конденсаторная сварка для монтажа термопар и токовых подводов. Для повышения производительности экспериментальных работ установлено дополнительное оборудование с целью осуществления отключения камеры от системы откачки и ее шлюзования на период замены исследуемого образца. Модернизация установки позволила ускорить проведение экспериментов в 10–12 раз.

По результатам исследования высокотемпературного состояния углеродистых сталей построены кривые пластического течения в истинных координатах «напряжение – деформация» при температурах 800–1000 °С, скорости $\dot{\varepsilon} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ c}^{-1}$ и степени деформации $\varepsilon = 2...35\%$ [5].

Исследование изменений электрического сопротивления образцов из углеродистой стали в вакуумной камере при высоких температурах косвенным путем показало различия в быстро протекающих процессах структурообразования при ТПО в сравнении с ТО [2].

Результаты испытаний углеродистой стали на конструктивную прочность после ТО и ТПО. С повышением температуры при ТО до 950 °С ($T_{\text{отп}} = 350^\circ\text{C}$) показатели прочности и пластичности стали 70 остаются примерно на одном уровне (таблица). Дальнейшее повышение температуры под закалку приводит к снижению пластичности, вязкости разрушения и повышению хрупкости, а показатели прочности практически не увеличиваются. Таким образом, исходя из результатов испытаний, наилучшие показатели прочности и трещиностойкости стали 70 при ТО наблюдаются после закалки с температуры нагрева 800 °С.

При ТПО стали 70 ($\varepsilon = 15\%$, $T_{\text{отп}} = 350^\circ\text{C}$) повышение температуры нагрева и деформации с 800 до 950 °С повышает показатели механических свойств: предел

текучности — на 110 МПа, предел прочности — на 90 МПа, относительное сужение — на 4 %. Показатели вязкости разрушения увеличиваются: критическое раскрытие трещины δ_c — с 0,063 до 0,073 мм, работа распространения трещины A_p , Н·м/см², и стрела прогиба $F_{трещ}$, мм, — более чем в два раза (см. таблицу).

Повышение температуры нагрева стали 70 (при ТПО) до 1000 °С не приводит к заметному повышению прочности и пластичности. Показатели механических свойств остаются на одном уровне, но вязкость разрушения снижается: δ_c с 0,073 до 0,058 мм; работа распространения трещины — с 5,1 до 3,8 Н·м/см², а величина прогиба — с 0,14 до 0,10 мм. Поэтому температуру нагрева 900–950 °С для ТПО стали 70 можно считать оптимальной. Сравнительный анализ результатов испытаний на растяжение, изгиб, вязкость, разрушение образцов после ТПО и ТО при температурах нагрева 800–1000 °С показал преимущества ТПО. После ТПО стали 70 (по оптимальным режимам) повышение предела текучести и предела прочности составляет 190–200 МПа, а пластичности — 40 %.

При испытании образцов на изгиб работа разрушения (A) и стрела прогиба ($F_{изг}$) увеличиваются, соответственно, на 14 % и 19,8 %. Испытаниями на вязкость разрушения установлено увеличение коэффициента интенсивности напряжения K_{Ic} на 18 %, критического раскрытия трещины δ_c на 2,8 % и стрелы прогиба $F_{изг}$ при испытании образцов после термопластической обработки с инициированной трещиной — на 40 %.

**Прочность и трещиностойкость стали 70 после ТПО и ТО
(температура отпуска — 350 °С при всех режимах)**

Показатель	Сталь 70 после ТПО ($\varepsilon = 15\%$)			Сталь 70 после ТО ($\varepsilon = 0\%$)		
	Температура нагрева, °C					
	800	950	1000	800	950	1000
$\sigma_{0,2}$, МПа	1540	1650	1620	1450	1470	1530
σ_B , МПа	1780	1870	1840	1680	1700	1740
ψ , %	24	28	19	20	23	13
A , Н·м/см ²	57,8	57,8	48,7	50,7	51,1	42,2
$F_{изг}$, мм	2,86	2,84	2,36	2,37	2,67	2,03
A_p , Н·м/см ²	2,5	5,1	3,8	4,5	3,0	2,1
δ_c , мм	0,063	0,073	0,058	0,071	0,069	0,047
F , мм (трещ.)	0,05	0,14	0,10	0,10	0,08	0,07

Испытаниями на растяжение установлено, что прирост прочности стали 70 после ТПО сохраняется при температурах отпуска до 400 °С. Нагрев стали при отпуске выше 450 °С снимает упрочнение, вызванное горячей деформацией, при всех исследованных режимах.

Исследуемые стали после ТПО и ТО (при температурах отпуска ниже 350 °С) подвергались испытанию на изгиб. Образцы, обработанные по обеим технологическим схемам, при температуре отпуска 250 °С и ниже имели хрупкое разрушение, но показатели пластичности и напряжение разрушения при изгибе образцов после ТПО во всех случаях выше.

Усталостные испытания образцов из углеродистых сталей показали преимущества обработки по схеме ТПО. При всех режимах усталостных малоцикловых испытаний на изгиб образцы из стали 70 имеют более высокие показатели (число циклов до разрушения, рис. 3). При напряжениях изгиба 900–1000 МПа число циклов до разрушения образцов после ТПО выше в 1,5–2,0 раза. При меньших

напряжениях изгиба (675–900 МПа) образцы после ТПО имеют число циклов до разрушения на 30 % больше, чем после ТО. Подобная зависимость наблюдается и при контактных усталостных испытаниях образцов. ТПО стали 70 повышает контактную усталостную прочность в 1,5–2,0 раза при нагрузках на индентор 4,5–5 кН. Так, например, при нагрузке до 5 кН число циклов до появления дефектов на поверхности исследуемых образцов составляет $4,1 \cdot 10^4$ и $1 \cdot 10^4$.

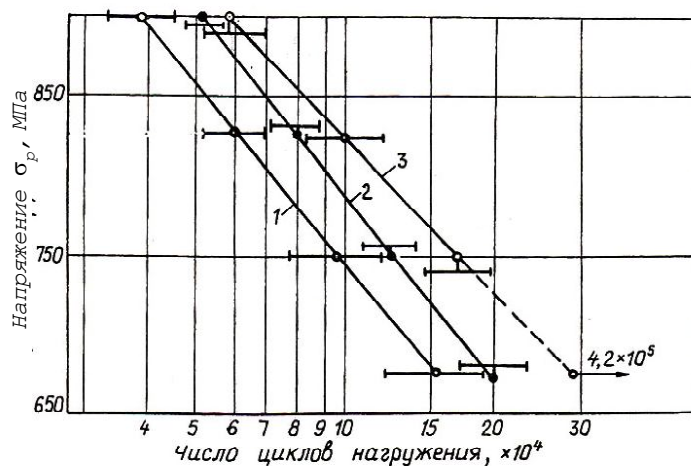


Рис. 3. Результаты испытаний на малоцикловую прочность стали 70:
1 – ТО, 2 – ТПО, 3 – сталь 70Т (0,1 % Ti), ТПО

При нагрузке на индентор 4 кН число циклов до разрушения образцов после ТПО составляет $4,1 \cdot 10^5$, а после ТО — $2,1 \cdot 10^5$. Нагрузка на индентор 3–3,5 кН не вызывает образования питтингов на поверхности образцов даже после $5 \cdot 10^6$ циклов нагружения (рис. 4).

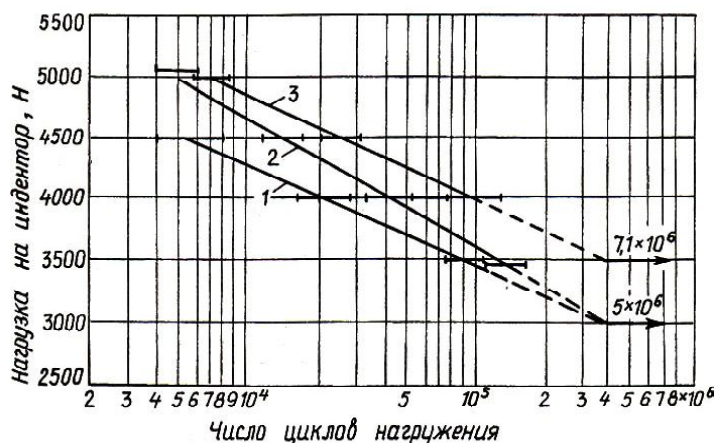


Рис. 4. Результаты испытаний на контактную выносливость стали 70:
1 – ТО, 2 – ТПО, 3 – сталь 70Т (0,1 % Ti), ТПО

Экспериментальными исследованиями установлено, что термопластическая обработка образцов из стали 70 позволяет получить повышение:

- предела текучести при растяжении на 200 МПа;
- предела прочности на 190 МПа;
- коэффициента интенсивности напряжения K_{1c} на 18 %;
- работы распространения трещины A_p на 13 %;

- полной работы разрушения образца без трещины на 14 %;
- величины прогиба образца (при испытании на изгиб) на 19,8 %;
- контактно-усталостной прочности в 1,5–2 раза;
- сопротивления циклическим нагрузкам в 1,7–2 раза.

Повышение прочности, пластичности и вязкости разрушения после ТПО и сохранение упрочнения исследуемых сталей объясняются особенностями их структурных построений.

Полигонально-ячеистая структура горячедеформированного аустенита, с относительно мелким зерном по сравнению с ТО (рис. 5), обеспечивает мелкоигльчатую структуру при последующем мартенситном превращении. Отпуск образцов при температурах до 400 °С сохраняет структуру с повышенной плотностью и упорядоченным расположением дислокаций [4].

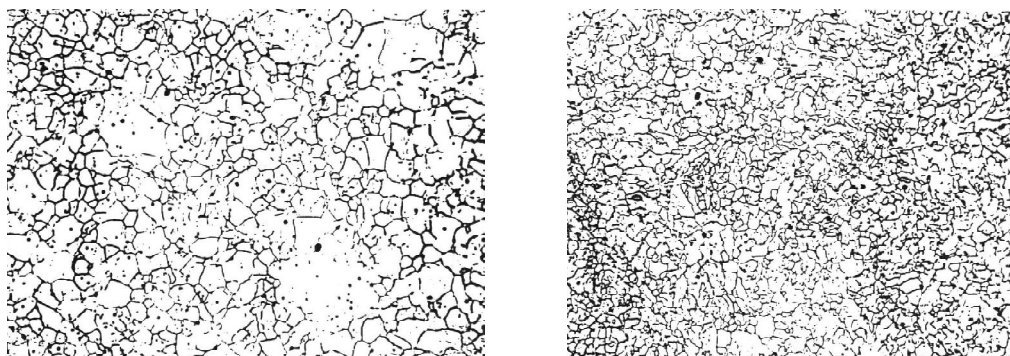


Рис. 5. Структура аустенита стали 70 после ТО и ТПО, $\times 100$

По результатам экспериментальных данных разработан метод оценки упрочнения и разупрочнения горячедеформированного материала, который позволил установить оптимальные режимы термопластической обработки для получения требуемых эксплуатационных свойств изготавливаемых или восстанавливаемых деталей. Для проведения ТПО деталей из углеродистой стали на предприятиях машиностроительного комплекса были рекомендованы оптимальные режимы [2, 5, 6].

Литература

1. Бернштейн М.Л. Структура деформированных металлов. М.: Металлургия, 1977. 431 с.
2. Тихомирова Л.Б., Решедько П.В., Решедько В.В. Рекристаллизация горячедеформированного аустенита // Новые методы упрочнения и обработки металлов. Новосибирск: НЭТИ, 1981. С. 75–88.
3. Патент на изобретение № 2245770 — Способ изготовления или восстановления деталей / В.В. Решедько, П.В. Решедько, В.А. Аксенов. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений РФ 10.02.2005.
4. Тихомирова Л.Б., Решедько В.В. Влияние температуры на развитие процессов динамической рекристаллизации эвтектоидной стали // Структура и конструктивная прочность стали. Новосибирск: НЭТИ, 1976. С. 39–46.
5. Решедько В.В. Новый метод восстановления деталей машин // Совершенствование средств механизации путевых, строительных и погрузо-разгрузочных работ. Новосибирск: СГУПС, 2001. С. 128–133.
6. Хромов В.Н. Восстановление деталей ЦПГ методом термоупругопластического деформирования // Автомобильная промышленность. 2000. № 8. С. 24–26.