



Kinetics of phase, structural conversions and change of characteristics depending on the temperature, heating and cooling speed, temperature of steel 60PP drawing is examined.

А. И. ГОРДИЕНКО, ФТИ НАН БЕЛАРУСИ, А. И. МИХЛЮК, БНТУ,
В. В. ИВАШКО, И. И. ВЕГЕРА, ФТИ НАН БЕЛАРУСИ

УДК 620.2

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ НАГРЕВА НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 60ПП

При производстве деталей автомобильной и автотракторной техники применяют упрочнение как высокопрочных легированных, так и конструкционных углеродистых сталей. Это связано, прежде всего, с возрастающими нагрузками на узлы и агрегаты машин вследствие увеличения их грузоподъемности, мощности и т. д. Поэтому перед конструкторами стоит выбор либо применять новые легированные стали, обеспечивающие необходимый уровень свойств, но при этом увеличивать стоимость продукции, либо совершенствовать технологию термической обработки конструкционных углеродистых сталей. На сегодняшний день развитие техники происходит по указанным выше направлениям. Создают новые высокопрочные стали методами легирования, оптимизируют их химический состав, снижают содержание вредных примесей за счет внедрения новых процессов плавки. Применение этих сталей сдерживается, прежде всего, экономическими факторами, так как производство деталей из этих материалов ведет к существенному их удорожанию, а упрочнение их традиционно проводится методами химико-термической обработки, что является длительным и высокоэнергопотребляемым процессом. Для конструкционных углеродистых сталей до настоящего времени основным методом упрочнения оставалось улучшение и поверхностное упрочнение с применением индукционного, лазерного или плазменного нагревов. Данное упрочнение не позволяло обеспечить равнопрочные свойства для этого класса сталей по сравнению химико-термической обработкой легированных сталей.

Оригинальными по достигаемым результатам являются стали пониженной прокаливаемости и методы их упрочнения, разработанные в 60-х годах К. З. Шепеляковским [1–3]. Основные особенно-

сти комплексной разработки заключаются в том, что для изготовления деталей с высокой поверхностной твердостью и прочной сердцевиной применяют специально разработанные автором стали пониженной или регламентированной прокаливаемости (стали ПП или РП). Примером таких материалов могут быть стали 55ПП, 60ПП, 80ПП и т. д. Для них характерно низкое содержание марганца (до 0,2%), кремния (до 0,3%) и хрома (до 0,15%), причем суммарное содержание легирующих элементов должно быть не более 0,5%. Вместе с тем, для сталей ПП вводятся строгие ограничения по количеству вредных примесей [4]. Глубина закаленного слоя этих сталей может составлять 10–25% от толщины или диаметра детали и зависит от содержания легирующих элементов. После закалки в поверхностном слое закаленной стали фиксируется мартенсит, а в сердцевине – феррито-цементитная смесь с твердостью 30–45 HRC. Метод термической обработки с применением глубинного высокочастотного нагрева заключается в том, что рабочее сечение деталей из сталей ПП и РП прогревают насквозь до надкритических температур, а затем закаливают в воде. Охлаждение деталей после нагрева осуществляют интенсивным водяным душем или быстродвижущимся потоком воды [5] с последующим самоотпуском или отпуском в печи при температуре 150–250 °С.

Стали ПП нашли широкое применение при производстве зубчатых колес взамен химико-термической обработки деталей из легированных сталей [6, 7], листовых рессор грузовых автомобилей [8–10], крестовин карданных валов [11–13]. В настоящее время проявляется существенный интерес к таким сталям для применения их в технике сельскохозяйственного назначения [14]. В данных работах показано, что применение сталей ПП для изготовления

деталей обеспечивает повышение твердости поверхностных слоев, глубины упрочненного слоя, износостойкости, сопротивление ударным нагрузкам, усталостной прочности. Вместе с тем, такая термическая обработка позволяет значительно сократить длительность нагрева, что приводит к снижению энергозатрат, себестоимости обработки, а также позволяет применять более дешевые марки сталей.

В представленной работе изучена кинетика фазовых, структурных превращений и изменения свойств в зависимости от температуры, скорости нагрева и охлаждения, температуры отпуска стали 60ПП. Исследования проводили на образцах листовых заготовок, применяемых для изготовления режущих элементов кормоуборочной техники, и на образцах, изготовленных из зубчатых деталей автотракторной техники.

Исследование влияния температуры закалки на структуру и механические свойства стали 60ПП

С целью изучения структуры и свойств стали 60ПП образцы размером 7,8×10×56 мм вырезали из горячекатаных листов в состоянии поставки и подвергали печной и скоростной термической

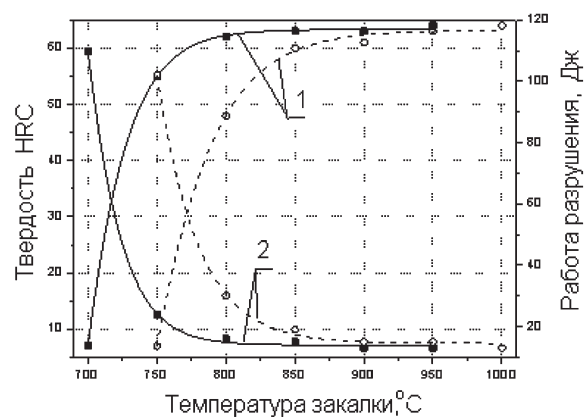


Рис. 1. Влияние температуры закалки на твердость и работу разрушения стали 60ПП. Размер образцов: 7,8×10×56 мм. Термообработка – печной нагрев 25 мин, вода; – скоростной нагрев $V_n = 50$ °C/c, вода; 1 – твердость; 2 – работа разрушения

обработке. Печной нагрев осуществляли при температурах 700–950 °C в течение 25 мин, а затем охлаждали в воде. Скоростной нагрев проводили со скоростью 50 °C/c до температур 750–1000 °C с последующим немедленным погружением образцов в воду. Термически обработанные образцы подвергали ис-

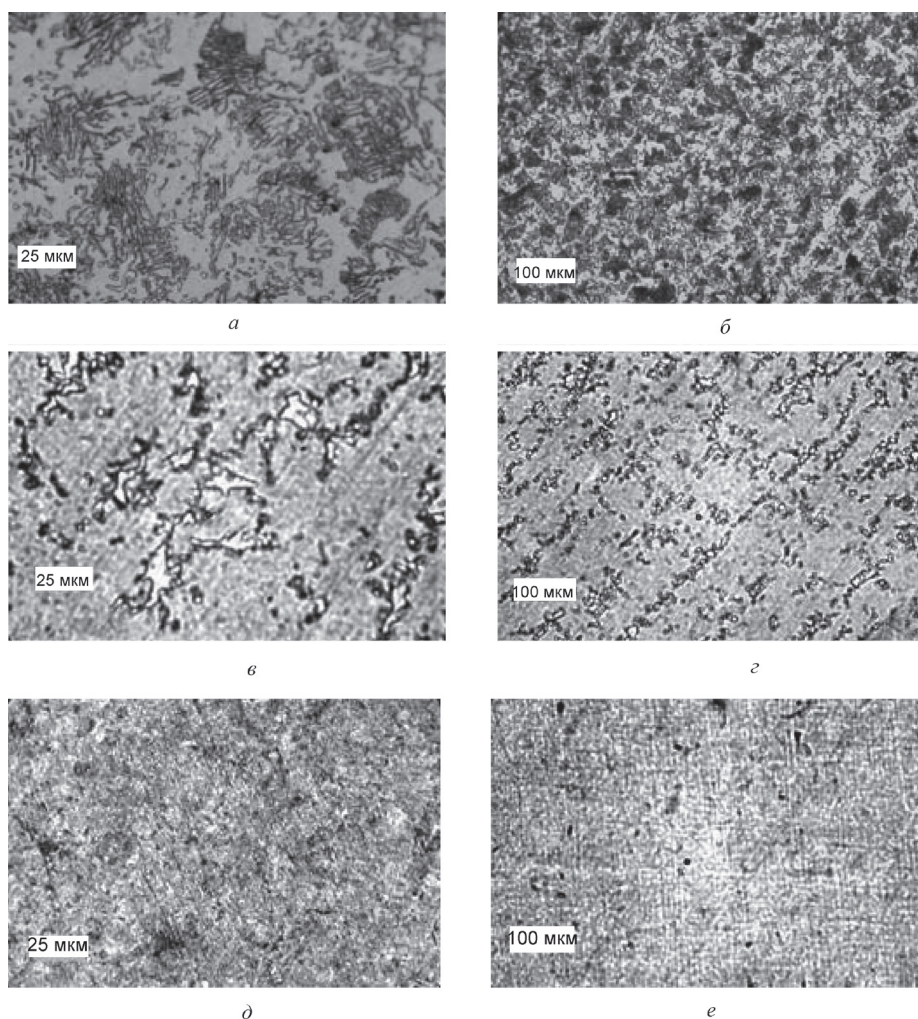


Рис. 2. Микроструктура стали 60ПП: Обработка: печной нагрев 25 мин, охлаждение вода; а, б – исходный металл; в, г – нагрев до 750 °C; д, е – нагрев до 850 °C

пытаниям на твердость, определяли работу разрушения, изучали микроструктурные изменения. Результаты испытаний приведены на рис. 1. Исследованиями было установлено, что при нагреве в печи до температуры 700 °С в течение 25 мин и последующем охлаждении в воде сталь 60ПП не упрочняется, а работа разрушения образцов равна 110 Дж.

Структура стали при этом, как и в исходном состоянии, полосчатая (рис. 2, а, б) и представляет собой феррит с колониями пластинчатого перлита.

С повышением температуры нагрева до 750 °С твердость закаленной стали резко возрастает до 55 HRC, работа разрушения образцов без надреза

снижается и составляет 25 Дж. Это связано с фиксированием в рамках бывших аустенитных зерен мартенсита и частиц нерастворившегося цементита, располагающихся по границам зерен в виде цепочек (рис. 2, в, з). Дальнейшее повышение температуры нагрева под закалку до 850–950 °С сопровождается повышением твердости до 62–64 HRC, а работа разрушения при этом снижается до 20 и 15 Дж соответственно. В структуре стали фиксируется гомогенный мартенсит (рис. 2, д, е).

При скоростном нагреве (скорость нагрева 50 °С/с) эффект упрочнения регистрируется после закалки в воде с температур, превышающих 750 °С.

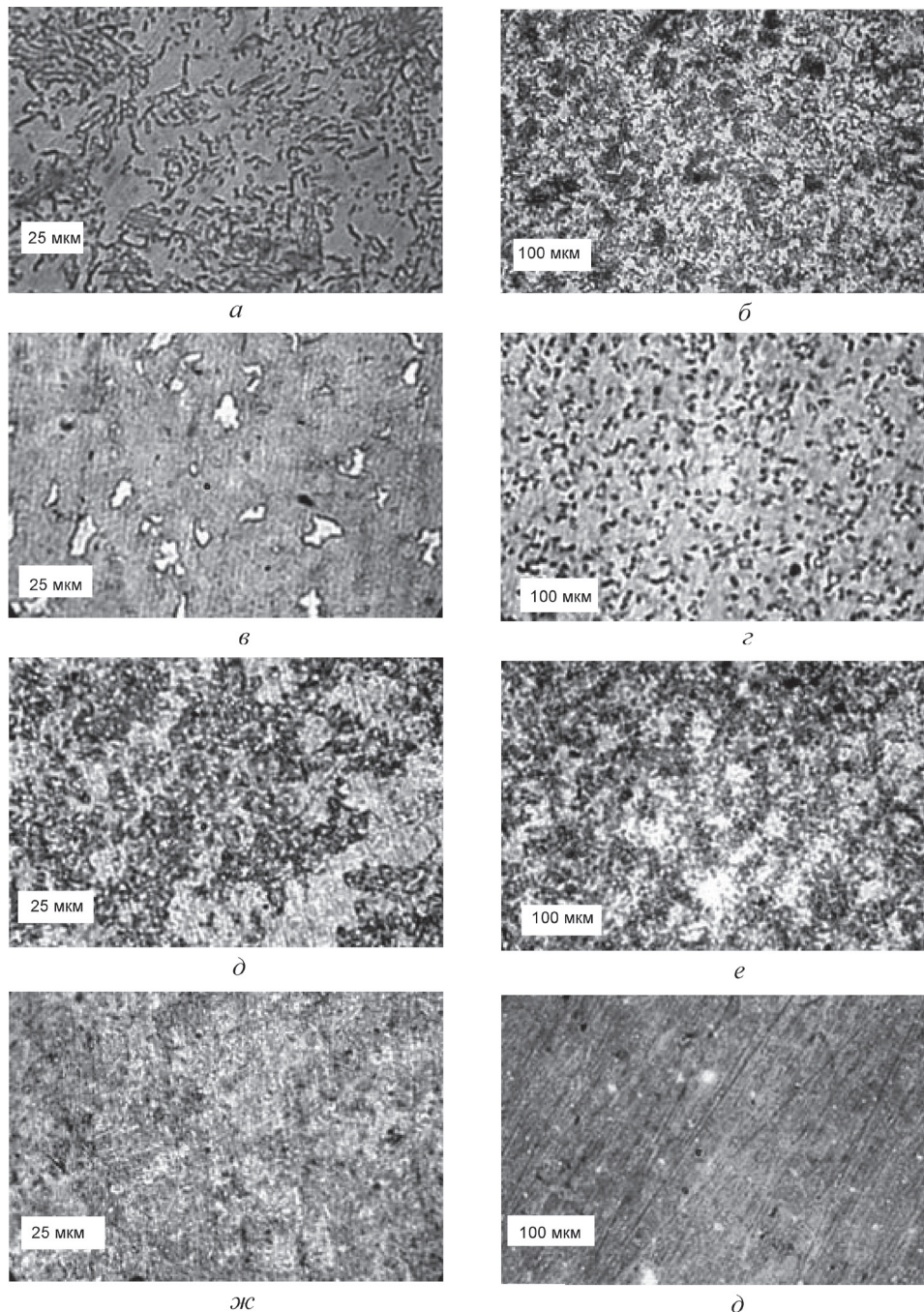


Рис. 3. Микроструктура стали 60ПП. Обработка: скоростной нагрев $V_H = 50$ °С/с, охлаждение вода; а, б – нагрев до 750 °С; в, г – 800; д, е – 900; ж, з – 1000 °С

Твердость образцов, закаленных с температуры 850 °С, возрастает до 48 HRC, а после закалки с 850 °С – до 60 HRC. При этом работа разрушения образцов снижается с 102 Дж при 750 °С до 30 и 20 Дж при 800–850 °С соответственно. Отличительной особенностью скоростного нагрева является смещение начала и конца фазового α - γ -превращения в сторону повышенных температур на 50 °С. Появление мартенсита регистрируется после нагрева выше 800 °С (рис. 3, в, з), а полное растворение карбидов наблюдается после нагрева до температуры 950 °С (рис. 3, ж, з). Твердость при этом повышается до 60–64 HRC при снижении работы разрушения до 12–10 Дж. Таким образом, применение скоростного нагрева смещает кривую упрочнения по сравнению с печным нагревом на 50 °С вверх по температурной шкале.

Исследование влияния температуры отпуска на структуру и механические свойства закаленной стали 60ПП

Как отмечалось выше, величина и параметры отпуска или самоотпуска при упрочнении сталей класса ПП являются важными технологическими параметрами, влияющими на конечные эксплуатационные показатели изделия. Из горячекатаных листов вырезали образцы стали 60ПП размером 7,8×10×56 мм и подвергали нагреву со скоростью 50 °С/с до температур 900 °С и последующей закалке в воде. В дальнейшем осуществляли отпуск в печи при температурах 150–500 °С в течение 2 ч с охлаждением на воздухе и при скоростном нагреве ($V_n = 50$ °С/с) до температур 200–500 °С с охлаждением в воде. Термообработанные образцы подвергали испытаниям на твердость и ударную вязкость, изучали микроструктурные изменения. Результаты испытаний приведены на рис. 4.

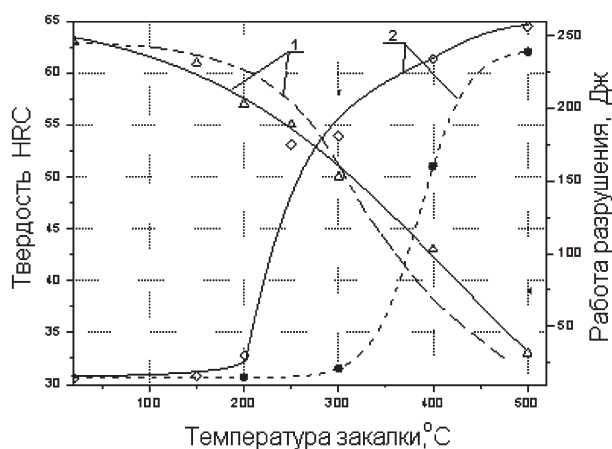


Рис. 4. Влияние температуры отпуска на твердость и работу разрушения термически упрочненной стали 60ПП. Размер образцов без надреза 7,8×10×56 мм. Термическая обработка: скоростной нагрев $V_n = 50$ °С/с, $T = 900$ °С, вода; — — печной отпуск 2 ч, воздух; - - - - скоростной отпуск $V_n = 50$ °С/с, вода; 1 – твердость; 2 – работа разрушения

После закалки твердость образцов составляла 62–63 HRC. Отпуск при температуре 150–200 °С 2 ч приводит к незначительному снижению твердости и повышению работы разрушения закаленных образцов. Твердость при этом снижается на 2–5 ед. HRC, а работа разрушения повышается до 30 Дж. В структуре стали не происходит видимых изменений и она аналогична закаленной, представляющей собой мартенсит с вкраплениями нерастворившихся карбидов (рис. 5, а).

С повышением температуры отпуска до 300 °С твердость снижается до 50 HRC, а работа разрушения резко повышается до 180 Дж. При этом в структуре стали происходит обеднение мартенсита углеродом и выделение мелкодисперсных карбидов (рис. 5, б). Дальнейшее повышение отпуска до 400–500 °С вызывает резкое снижение твердости до 43–32 HRC, а работа разрушения повышается до 230–250 Дж. В структуре стали происходит дальнейшее выделение карбидной фазы и ее коагуляция (рис. 5, в). Применение скоростного отпуска ($V_n = 50$ °С/с) показывает, что после нагрева до 200 °С твердость, работа разрушения и структура (рис. 5, з) образцов сохраняются на уровне закаленных. После нагрева до 300 °С твердость понижается до 50–52 HRC, в то время как работа разрушения увеличивается незначительно (30 Дж), в структуре стали формируется отпущенный мартенсит (рис. 5, д).

Повышение температуры отпуска до 400–500 °С вызывает резкое падение твердости до 42–37 HRC, в то время как работа разрушения резко увеличивается от 160 до 240 Дж. Структура стали представляет собой отпущенный мартенсит с включениями карбидной фазы, коагуляция которой не происходит (рис. 5, е). Обобщая полученные данные, можно констатировать, что при скоростном нагреве происходит смещение температурного интервала обработки на 50–100 °С по сравнению с печным нагревом. Применение скоростного нагрева для операции отпуска позволяет существенно сократить время обработки за счет повышения температуры нагрева на 100 °С и при этом получить высокие значения твердости и работы разрушения стали.

Кроме того, были выполнены сравнительные исследования влияния температуры отпуска на твердость и ударную вязкость сталей 60ПП и 20ХН3А на образцах, изготовленных из зубчатых поверхностей деталей автотехники. Зубчатые образцы вырезали из зуба детали 5336–2405035 «сателлит» колесной передачи автомобиля МАЗ. Результаты испытаний приведены на рис. 6.

Анализ полученных результатов показал, что температура отпуска в большей мере снижает твердость изделий из стали ПП, причем после темпера-

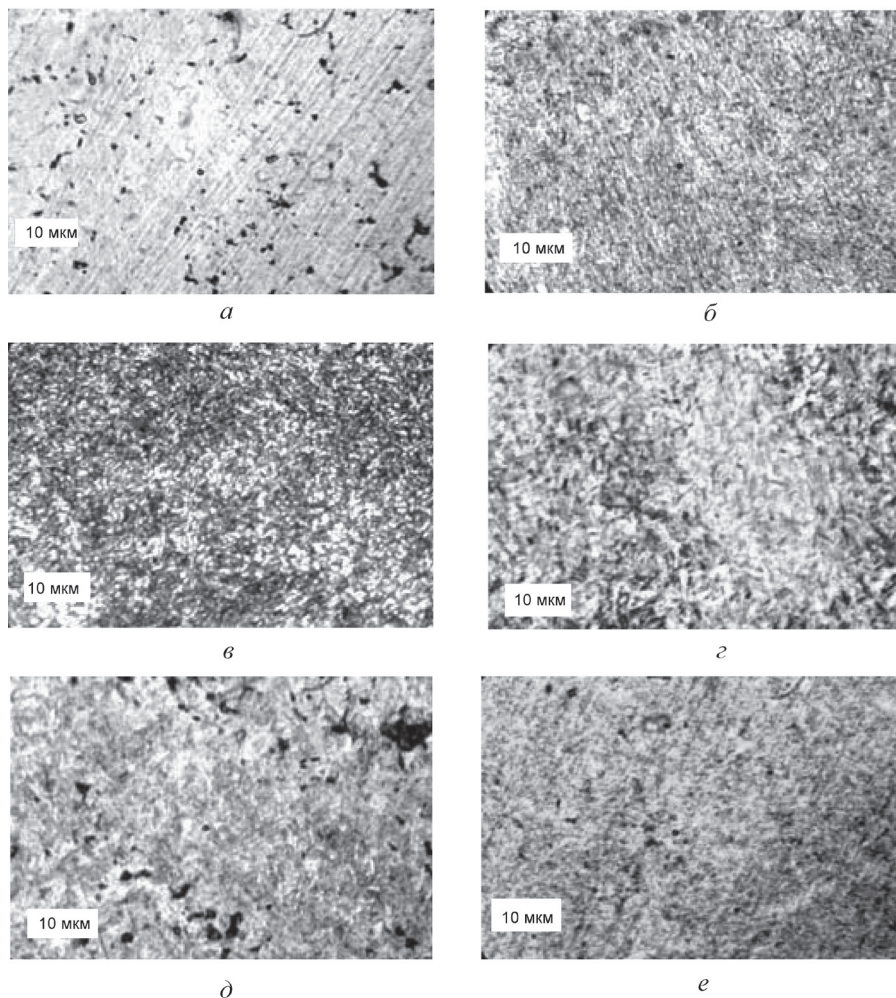


Рис. 5. Микроструктура стали 60ПП после отпуска. Обработка: скоростной нагрев $V_n = 50 \text{ }^\circ\text{C/s}$, $900 \text{ }^\circ\text{C}$, охлаждение вода, печной отпуск 2 ч (*a* – $200 \text{ }^\circ\text{C}$; *b* – 300 ; *c* – 400); скоростной отпуск $V_n = 50 \text{ }^\circ\text{C/s}$ (*d* – $200 \text{ }^\circ\text{C}$; *e* – $400 \text{ }^\circ\text{C}$)

туры отпуска более $240 \text{ }^\circ\text{C}$ твердость уменьшается значительно. Для изделий из стали 20ХН3А наблюдается плавное снижение твердости с увеличением температуры отпуска.

Для показателя ударной вязкости наблюдается противоположная картина. Увеличение температуры отпуска от 120 до $280 \text{ }^\circ\text{C}$ привело к увеличению

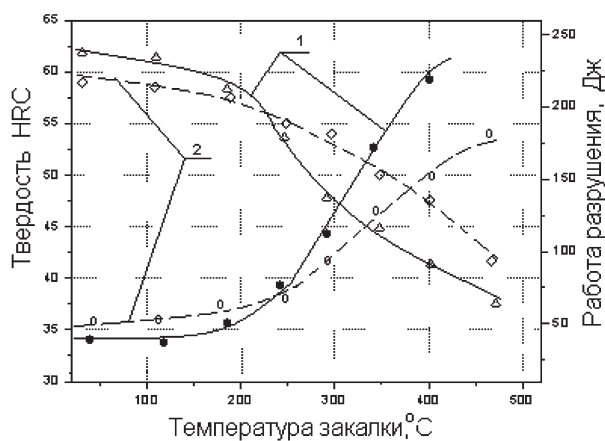


Рис. 6. Влияние температуры отпуска на твердость и работу разрушения термически упрочненных зубчатых деталей из сталей 60ПП и 20ХН3А: 1 – сталь 60ПП; 2 – сталь 20ХН3А

работы разрушения для стали 60ПП в 2,1 раза, а для стали 20ХН3А – только в 1,53 раза (рис. 6).

Значительная разница в величине работы разрушения при испытаниях на ударный изгиб также подтверждается при внешнем осмотре излома образцов из различных материалов. На рис. 7 показан внешний вид изломов образцов из сталей 20ХН3А и 60ПП. На рисунке видны зоны цементации и объемно-поверхностной закалки, причем зона ОПЗ как минимум в 2 раза толще.

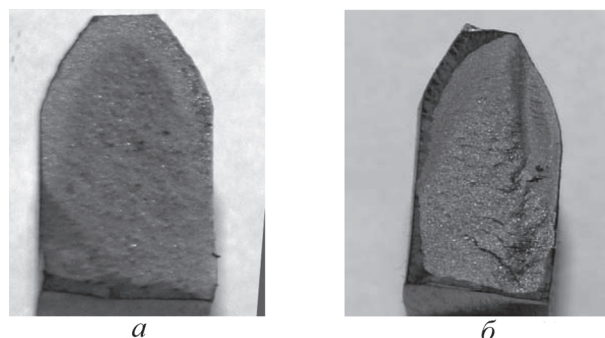


Рис. 7. Внешний вид излома разрушенных при испытании на ударный изгиб образцов: *a* – сталь 20ХН3А; *b* – сталь 60ПП

Исследование влияния скорости охлаждения на механические свойства закаленной стали 60ПП

С целью оценки критической скорости охлаждения образцы стали 60ПП нагревали скоростным методом ($V_n = 50 \text{ }^\circ\text{C/c}$) до температуры 900°C , а затем охлаждали с различными скоростями 1, 5, 15 $^\circ\text{C/c}$ (воздух), 50 $^\circ\text{C/c}$ (сжатый воздух), 400 $^\circ\text{C/c}$ (вода). Отдельные образцы нагревали до $900 \text{ }^\circ\text{C}$ и охлаждали вместе с печью со скоростью 0,03 $^\circ\text{C/c}$.

Как показывают данные, приведенные на рис. 4, наибольшей твердостью 63 HRC обладают образцы, охлажденные со скоростью 400 $^\circ\text{C/c}$, однако работа разрушения таких образцов низкая и составляет 15 Дж. Снижение скорости охлаждения из γ -области до 50 $^\circ\text{C/c}$ сопровождается снижением твердости до 27 HRC, а работа разрушения при этом резко возрастает до 300 Дж. Дальнейшее снижение скорости охлаждения не позволяет получить на стали 60ПП необходимой твердости, при этом работа разрушения возрастает до 300 Дж и более. Поэтому для получения высокой твердости сталь 60ПП следует охлаждать с критическими скоростями выше 400 $^\circ\text{C/c}$.

Исследование поверхностного упрочнения стали 60ПП в зависимости от режимов нагрева и охлаждения

Для исследования эффективности поверхностного упрочнения при объемном нагреве образцы стали 60ПП вырезали из горячекатаной заготовки толщиной 7,8 мм и проводили термическую обработку по режиму: печной нагрев $850 \text{ }^\circ\text{C}$, 25 мин, интенсивное охлаждение в воде; скоростной нагрев ($V_n = 50 \text{ }^\circ\text{C/c}$) до температуры $900 \text{ }^\circ\text{C}$ и сброс образца в воду (рис. 8).

На рис. 9 приведены результаты измерения твердости образца, вырезанного из ножа кормоуборочного комбайна после нагрева в печи и закалки в воде. Проведенные исследования показали, что образец толщиной 7,8 мм при условии интенсивного охлаждения прокаливается насквозь. На поверхности образца в результате закалки формируется мартенситная структура (рис. 10, а) с твер-

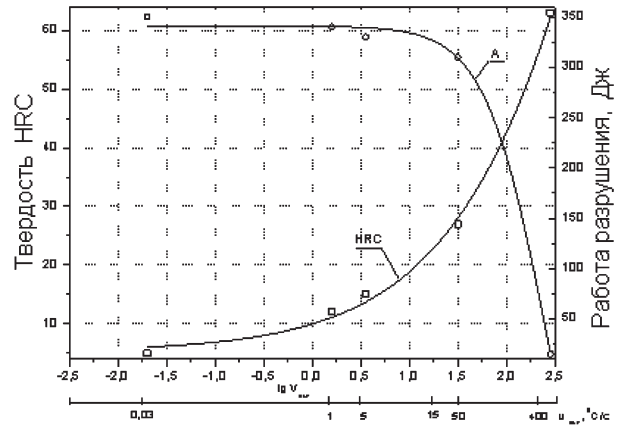


Рис. 8. Влияние скорости охлаждения на твердость и работу разрушения стали 60ПП. Термическая обработка: скоростной нагрев $V_n = 50 \text{ }^\circ\text{C/c}$, $T = 900 \text{ }^\circ\text{C}$. Размер образцов без надреза $7,8 \times 10 \times 56 \text{ мм}$

достью 60–64 HRC. При этом следует отметить, что при печном нагреве на поверхности образцов образуется обезуглероженный слой толщиной 0,1–0,2 мм (рис. 10, з).

В сердцевине образца структура представляет собой мартенсит с участками промежуточных продуктов распада аустенита (рис. 10, б, в). Твердость сердцевины образца составляет 56–58 HRC.

После скоростного нагрева ($V_n = 50 \text{ }^\circ\text{C/c}$) до $900 \text{ }^\circ\text{C}$ и немедленного охлаждения погружением в воду по толщине образцов наблюдаются неравномерный закаленный слой и разброс значений твердости по поверхности образца. В поверхностных слоях толщиной 2–3 мм твердость закаленной стали составляет 62–64 мм, а в сердцевине образца и в месте приварки термопары она снижается до 38 HRC. Данное обстоятельство связано с высокой чувствительностью стали 60ПП к скорости охлаждения. В процессе охлаждения в стоячей воде на отдельных поверхностях образуется воздушная рубашка, приводящая к резкому снижению скорости охлаждения ниже критической и распаду аустенита.

На поверхности образца фиксируется мартенситная структура с градиентным распределением углерода, характерным для скоростного нагрева



Рис. 9. Распределение твердости по глубине закаленной заготовки ножа кормоуборочного комбайна из стали 60ПП. Обработка: печной нагрев $850 \text{ }^\circ\text{C}$, 25 мин, интенсивное охлаждение в воде

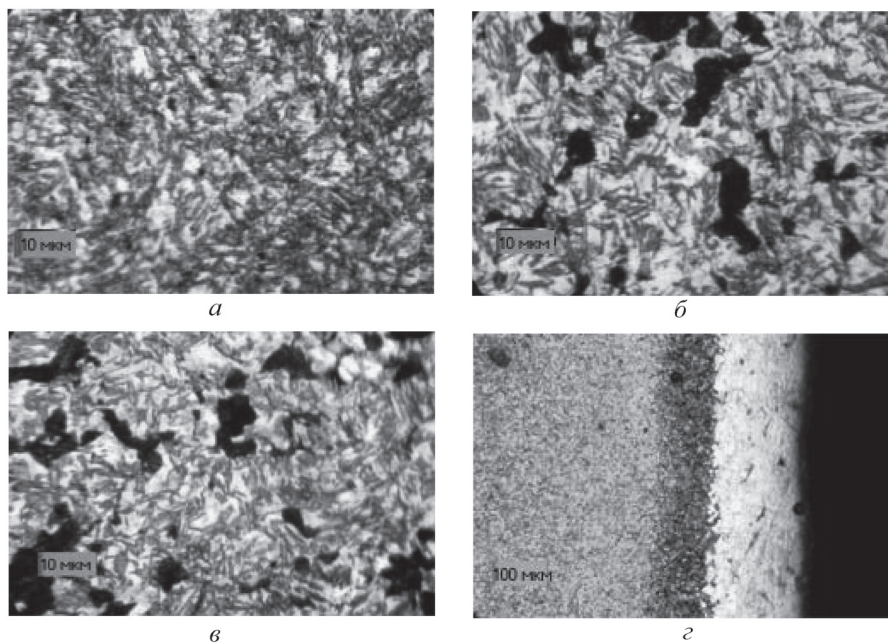


Рис. 10. Микроструктура ножа из стали 60ПП: *а* – острие центр; *б* – перегиб центр; *в* – сердцевина; *г* – обезуглероженный слой. Обработка: печной нагрев 850 °С, 25 мин, охлаждение вода

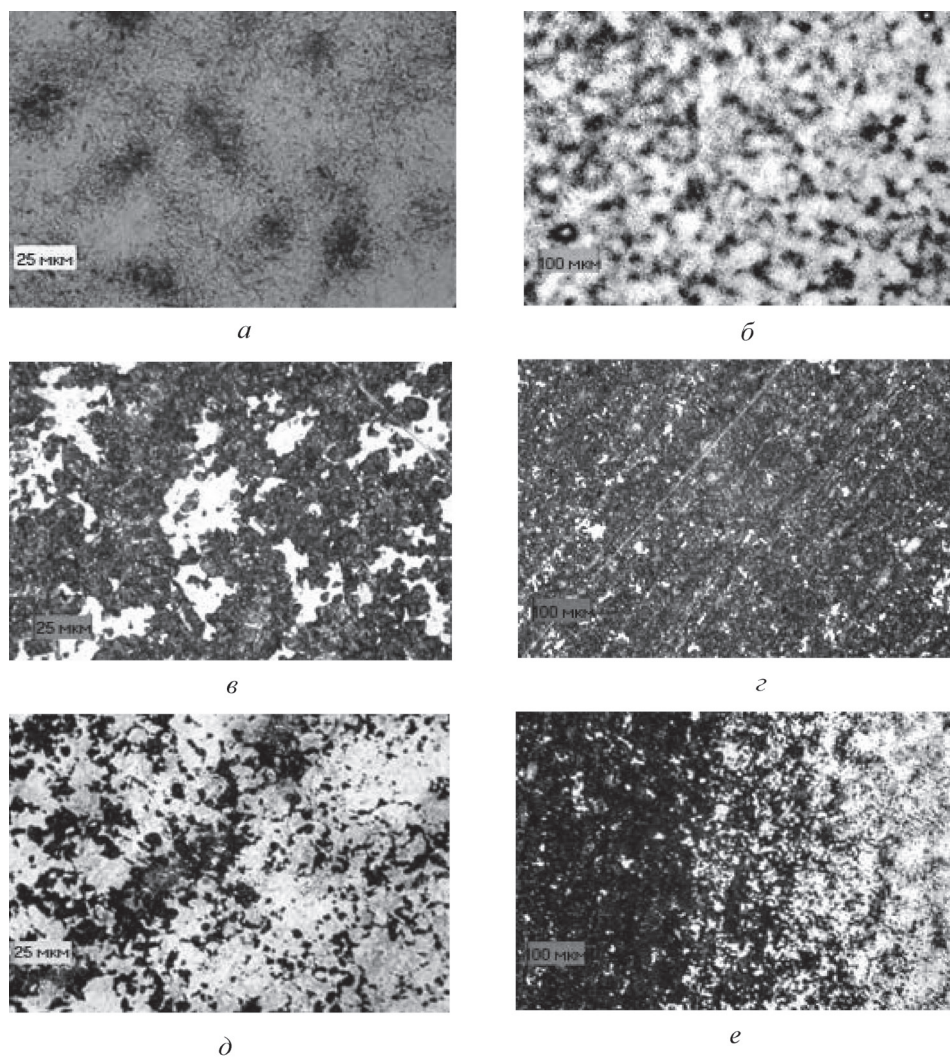


Рис. 11. Микроструктура стали 60ПП. Обработка: скоростной нагрев 900 °С, $V_n = 50$ °С/с, охлаждение вода; *а*, *б* – поверхность образца; *в*, *г* – сердцевина; *д*, *е* – промежуточный слой

(рис. 11, а, б), а в сердцевине – полураспавшийся аустенит (рис. 11, в, з). В отличие от печного нагрева структура образца мелкозернистая.

Выводы

1. При нагреве под закалку деталей из стали 60ПП применение скоростного нагрева ($V_n = 50 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$) смещает кривую упрочнения по сравнению с печным нагревом на 50°C вверх по температурной шкале.

2. Упрочнение изделий из сталей класса ПП со скоростями охлаждения выше $400 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ обеспечивает твердость поверхности 62–66 HRC при глубине упрочненного слоя в 2,0–2,5 раза выше, чем при

химико-термической обработке. Микроструктура закаленного слоя представляет собой мартенсит мелкоигольчатый и по размеру зерна она более мелкая, чем при цементации, при этом для стали 60ПП полностью отсутствует такая составляющая, как аустенит остаточный.

3. Для обеспечения равнозначной с химико-термической обработкой твердости изделия из стали класса ПП требуют ограничения значений температур отпуска (самоотпуска). Увеличение данного технологического параметра выше $240\text{--}260 \text{ }^\circ\text{C}$ приводит к значительному снижению твердости (до 10 ед. HRC) при одновременном увеличении работы разрушения.

Литература

1. Шепеляковский К. З. Упрочнение деталей машин поверхностной закалкой при индукционном нагреве. М.: Машиностроение, 1972.
2. Шепеляковский К. З. Поверхностная и объемно-поверхностная закалка стали как средство упрочнения ответственных деталей машин и экономии материальных ресурсов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1993. № 11. С. 8–14.
3. Шепеляковский К. З. Объемно-поверхностная закалка как способ повышения прочности, надежности и долговечности деталей машин // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1995. № 11. С. 2–9.
4. Пат. Россия 2158320: МПК C22C38/50. Конструкционная сталь пониженной прокаливаемости / К. З. Шепеляковский и др.
5. Пат. Россия 2089624: МПК C21D1/62. Устройство для охлаждения деталей / Б. К. Ушаков, В. К. Галкин.
6. Современная практика применения сталей пониженной прокаливаемости для деталей грузовой автотехники / П. С. Гурченко, А. П. Ракомсин, А. И. Михлюк, В. А. Гуринович // *Вестник машиностроения*. 2007. № 5. С. 57–60.
7. Михлюк А. И. Перспективы применения сталей пониженной прокаливаемости для изготовления деталей автомобилей МАЗ // *Инженер-механик*. 2008. № 1. С. 2–8.
8. Шепеляковский К. З., Исмаилов Р. Р., Литвин А. Н. и др. Новая технология термической обработки рессорных листов грузовых автомобилей // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1992. № 2. С. 11–14.
9. Пат. Россия 2158314: МПК C21D9/02, C21D9/40. Рессорный лист высокой прочности и долговечности / К. З. Шепеляковский и др.
10. Новая чувовская рессора для КамАЗа: проверка на дорогах // *Грузовик Пресс*. 2005. № 4.
11. Костюкович Г. А. Технология изготовления крестовин карданных валов из стали пониженной прокаливаемости 60ПП // *Вестник ГрГУ. Сер. 2*. 2003. № 1. С. 68–74.
12. Пат. Россия 2212345: МПК B60K17/22. Карданный вал наземных транспортных средств / В. А. Дроздов и др.
13. Пат. Россия 2234428: МПК B60K17/22. Карданный вал наземных транспортных средств / В. П. Лобозов и др.
14. Бетенья Г. Ф., Литовчик Д. П., Сушко И. С. Технология термической обработки деталей рабочих органов почвообрабатывающих машин // *Сб. тр. «Технология, оборудование, автоматизация, неразрушающий контроль термических процессов на машиностроительных предприятиях»*; Под общ. ред. П. С. Гурченко. Мн., 2005. С. 40–42.