

межремонтному пробегу агрегата с полным использованием остаточной долговечности деталей.

### Литература

1. Михлин, В.М. Управление надежностью сельскохозяйственной техники / В.М. Михлин. – М.: Колос, 1984. – 335 с.
2. Иванов, В.П. Влияние качества ремонта двигателей на их долговечность / В.П. Иванов, А.П. Кастрюк // Вестник государственного технического университета им. П.О. Сухого. – 2012. – № 3. – С. 30 – 34.
3. Иванов, В.П. Комплект деталей для ремонта двигателя ЗМЗ-53 / В.П. Иванов, В.Ф. Титов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1990. – № 9. – С. 48 – 49.

### УДК 669.15

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЛИСТОВ СТАЛИ 40X

**В.В. Ивашко, С.Р. Ларичков**

Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск

*Приведены результаты механических испытаний термически упрочненных листовых образцов стали 40X с применением печного и скоростного нагрева.*

В последнее время особое внимание уделяется разработке режимов термической обработки тонкостенных изделий, толщина которых не превышает 3 мм. Термообработка такого вида деталей требует повышенного внимания для защиты поверхностных слоев от окисления и обезуглероживания. В этой связи применение скоростных методов нагрева (индукционного, электроконтактного) позволяет уменьшить или исключить окисление и обезуглероживание, измельчить зеренную структуру и повысить комплекс механических свойств. Образцы размером 3x10x100 мм, вырезанные из листов стали 40X, нагревали в печи при температурах 750, 800, 850, 900 и 950 °С в течение 30 мин и закаливали в воде. После нагрева до 850 – 950 °С и последующей закалки в воде твердость листов стали 40X составляет 58-60 HRC. При достижения такой твердости механические свойства листов теряют стабильность, а пластические свойства резко снижаются. Поэтому для дальнейших исследований закаленные образцы стали 40X подвергали дополнительному отпуску при температуре 220 °С в течение 1,5 часа. Результаты механических испытаний образцов, претерпевших закалку в воде и последующий отпуск при температуре 220 °С, показали, что после закалки с температуры 750 °С и последующего отпуска при температуре 220°С 1,5 часа временное сопротивление на разрыв составляет 1888

МПа, предел текучести 1813 МПа, относительное удлинение и сужение составляет 6,0 и 20,7% соответственно. После нагрева до 800 °С и закалки в воде был достигнут максимальный уровень механических свойств:  $\sigma_b=1969$  МПа,  $\sigma_{0,2}=1843$  МПа,  $\delta=8,5$  %,  $\psi=23$ %. В результате закалки с 850 °С предел прочности и предел текучести снижался до 1941 и 1762 МПа соответственно. Относительное удлинение и сужение составляли 7,8 и 23,8% соответственно. С повышением температуры нагрева под закалку до 900 и 950 °С прочностные характеристики листовой стали снижались до 1835 и 1608 МПа соответственно, причем пластические характеристики стали снижались до  $\delta=7,6$  %,  $\psi=19,8$ % после закалки с температуры 900 °С и до  $\delta=1,1$  %,  $\psi=2,1$ % после закалки с 950 °С.

Образцы стали 40Х после нагрева в печи при температуре 810 °С, 30 мин и закалки в воде подвергали отпуску при температурах 160, 195, 220 и 240°С в течение 1,0 часа, а затем испытывали на растяжение и на ударную вязкость. Показано, что после отпуска при температуре 160 °С временное сопротивление на разрыв составляет 2099 МПа, предел текучести 1826 МПа, относительное удлинение 7,0%, относительное сужение 11,8%. Работа разрушения образцов размером 3x10x56 мм без надреза ( $A_{6H}$ ) составляла 31 Дж. С повышением температуры отпуска до 195 °С механические свойства снижались до  $\sigma_b=2045$  МПа,  $\sigma_{0,2}=1818$  МПа,  $\delta=8,5$ %,  $\psi=15,5$ %,  $A_{6H}=27$  Дж. После отпуска при температуре 220 °С предел прочности закаленных образцов составил 1960 МПа, предел текучести 1803,7 МПа, относительное удлинение 6,5%, относительное сужение 14,8%, работа разрушения 36 Дж. Резкое повышение пластичности наблюдается после отпуска 240 °С. Относительное удлинение повышается до 11%, а относительное сужение до 23%. Прочностные характеристики при этом снижаются до  $\sigma_b=1858$  МПа,  $\sigma_{0,2}=1751,7$  МПа, а работа разрушения повышается до 44 Дж. Такое изменение механических свойств связано с распадом мартенсита. Первое превращение мартенсита связано с неравномерным выделением  $\epsilon$ -карбида ( $Fe_2C$ ), когерентно связанного с мартенситом и протекает в интервале температур 20-200 °С. После нагрева закаленной стали 40Х в интервале температур 200-260 °С протекает распад мартенсита во всем объеме. В результате распада образуется смесь кристаллов низкоуглеродистого мартенсита и дисперсных карбидов.  $\epsilon$ -карбид превращается в  $Fe_3C$  и когерентность связи с мартенситом нарушается, что обуславливает повышение пластичности.

Скоростной нагрев ( $V_n=50$  °С/с) проводили с использованием образцов стали 40Х в исходном горячекатаном состоянии. Показано, что после скоростного нагрева до температуры 750 °С, охлаждения в воде и отпуска при температуре 220 °С образцы стали 40Х практически не упрочнялись. Предел прочности и предел текучести составляли 740 и 679 МПа, относительное удлинение и сужение – 18,2 и 41,8% соответственно. Резкое

повышение прочностных характеристик наблюдали после закалки с температуры 810 °С. Временное сопротивление на разрыв и предел текучести составляли 1786 и 1639 МПа соответственно. Данное обстоятельство связано с изотермическим превращением феррито-перлитной смеси в феррито-аустенитную при температуре эвтектоидного превращения. Пластические характеристики при этом снижаются до  $\delta = 7 \%$ ,  $\psi = 17,6 \%$ . Дальнейшее повышение температуры нагрева до 950 °С сопровождается плавным снижением прочностных свойств до 1605 и 1478 МПа и пластических характеристик до  $\delta = 1,6 \%$ ,  $\psi = 6,0 \%$ .

Анализ микроструктуры показал, что в условиях скоростного нагрева наблюдается повышение температур растворения феррита в область повышенных температур. После закалки с температуры 750 °С и отпуска 220 °С в структуре наблюдаются феррит и перлит. На образцах, закаленных с температуры 810 °С, фиксируется частично распавшийся бесструктурный мартенсит, сформированный в перлитных колониях и нерастворившийся феррит. После закалки с температуры 860 °С наблюдается микроструктура игольчатого мартенсита, что свидетельствует о собирательном росте зерен. Отличительной особенностью микроструктуры стали 40Х после скоростного нагрева является неомогенное распределение углерода по объему и наличие нерастворенных ферритных частиц. Наличие нерастворенных частиц феррита наблюдается и на образцах, закаленных с температуры 940 °С. Следует отметить, что наличие нерастворенных частиц феррита и неомогенного распределения углерода при закалке с аустенитной области является отличительной особенностью скоростного нагрева, что приводит к снижению прочностных и повышению пластических характеристик.

Образцы стали 40Х, закаленные в воде после скоростного нагрева ( $V_n = 50^\circ\text{C}/\text{c}$ ) до температуры 860 °С, подвергали отпуску в печи при температурах 200, 220, 240 и 260 °С в течение 1 ч. Показано, что после закалки и отпуска при температуре 200 °С механические свойства листов стали 40Х следующие:  $\sigma_b = 1709$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 1590$  МПа,  $\delta = 5,9 \%$ ,  $\psi = 25,4\%$ . С повышением температуры отпуска до 220 и 240 °С временное сопротивление на разрыв повышается до 1740 и 1787 МПа, предел текучести до 1600 и 1590 МПа, работа разрушения от 24 до 26 Дж, а относительное удлинение повышается от 6,3 до 7,6% соответственно. Относительное сужение в данном интервале температур отпуска сохраняется на уровне 25,6–25,9%. После отпуска при температуре 260 °С предел прочности и предел текучести понижаются до 1634 и 1513 МПа, работа разрушения повышается до 52 Дж. Пластические свойства листов при этом снижаются до  $\delta = 5,9 \%$ ,  $\psi = 25,4\%$ , что может быть связано с частичным развитием отпускной хрупкости.

По разработанным режимам проводили объемное упрочнения элементов баллистической защиты, а также поверхностное упрочнение труб, используемых при изготовлении или ремонте бурильных установок.