

П.С. Гурченко, А.В. Толстой, А.А. Шипко

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ШЕСТЕРЕН, УПРОЧНЕННЫХ МЕТОДОМ ОБЪЕМНО–ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКИ

*Минский автомобильный завод,
Институт механики и надежности машин НАН Беларуси
Минск, Беларусь*

Основным видом упрочняющей обработки, применяемой при изготовлении тяжело нагруженных шестерен автомобилей и тракторов, является цементация. Однако этот метод имеет ряд существенных недостатков, главные из которых – высокая энергоемкость, большая длительность процесса, необходимость применения специальных марок сталей. Альтернативой ему может служить метод объемно–поверхностной закалки, обладающий высокой производительностью, дешевизной и позволяющий использовать для изготовления указанных деталей более дешевые марки машиностроительных сталей [1–3]. Основная задача данной работы состояла в проведении комплекса металлофизических исследований структуры и свойств шестерен, изготовленных из различных материалов и упрочненных методом объемно–поверхностной закалки с целью выбора оптимальных режимов их упрочнения. На завершающем этапе проводили стендовые и дорожные испытания упрочненных шестерен.

Как известно, глубина упрочненного слоя является одним из параметров, определяющих надежность работы изделий. В частности, для тяжело нагруженных деталей критерием оценки толщины упрочненного слоя рекомендуется считать эффективную толщину слоя, которая определяется расстоянием от поверхности до зоны закаленного слоя с твердостью 550 HV [3]. В результате измерения микротвердости по глубине упрочненного слоя исследуемых материалов было установлено следующее.

Сталь 20ХНЗА. Величина микротвердости у поверхности составляет 640 единиц и сохраняет это значение до глубины 0,4 мм, после чего начинает плавно уменьшаться, достигая 500 единиц на расстоянии 1,2 мм от поверхности и падая до значения 390 Н_ц в сердцевине материала. Принимая во внимание указанный выше критерий, эффективную толщину упрочненного в результате цементации слоя следует принять равной 1,2 мм.

Сталь 45. Величина твердости у поверхности здесь заметно выше (730 единиц). Это значение сохраняется до глубины 0,6 мм, затем плавно уменьшается до 410 Н_ц в сердцевине. Глубина упрочненного слоя составляет 2,4–2,5 мм.

Сталь 60ПП. Величина микротвердости у поверхности составляет ≈750 единиц и сохраняет это значение до глубины 1 мм, после чего начинает плавно уменьшаться, достигая 500 единиц на расстоянии 2,5 мм от поверхности и падая до значения 300 Н_ц в сердцевине материала. Принимая во внимание указанный выше критерий, эффективную толщину упрочненного слоя этого образца следует принять равной 2,2 мм.

Сталь У8А. Для этого материала величина микротвердости у поверхности также составляет ≈750 единиц, но, в отличие от стали 60ПП, сохраняет это значение до глубины 1,3 мм, после чего начинает плавно уменьшаться, достигая 500 единиц на расстоянии 2,9 мм от поверхности. При этом твердость сердцевины материала

составляет 420 Н_ц. Эффективная толщина упрочненного слоя стали У8А равна примерно 2,5 мм.

Сталь 40ХН. У этого образца микротвердость имеет наиболее высокое значение (790 Н_ц), причем характер ее распределения совершенно иной, нежели у образцов 1–3 – микротвердость не меняется вплоть до расстояния 4,9 мм от поверхности. Последнее указывает на то, что эффективная толщина закаленного слоя этого образца больше 5 мм.

Чугун СЧ20. Ход кривой изменения микротвердости по глубине слоя аналогичен указанному выше. Однако уровень максимальной твердости (640 Н_ц) сохраняется на большей глубине – 0,8 мм от поверхности, после чего также начинает плавно уменьшаться, достигая значения 300 Н_ц в сердцевине материала. Эффективная глубина упрочненного слоя для этого образца равна 2 мм.

Определенный интерес представляет изучение распределения твердости по контуру и сечению зубьев шестерен. Подобные исследования были выполнены в работе [4] для шестерен, упрочненных методом непрерывно–последовательного индукционного нагрева рабочих поверхностей с последующим охлаждением струей воды. В результате было установлено, что твердость впадины зуба несколько ниже, чем боковых поверхностей, а средняя часть вершины всех зубьев остается незакаленной.

Схематическое изображение шестерни и результаты измерения твердости закаленной зоны для шестерен, подвергнутых объемно–поверхностной закалке, представлены на рис. 2. Распределение твердости по контуру зуба определяли на расстоянии 0,20 - 0,35 мм от его поверхности. Из сравнения этих данных с приведенными в [4] видно, что распределение твердости по контуру зуба у шестерен, упрочненных методом объемно–поверхностной закалки, более однородно.

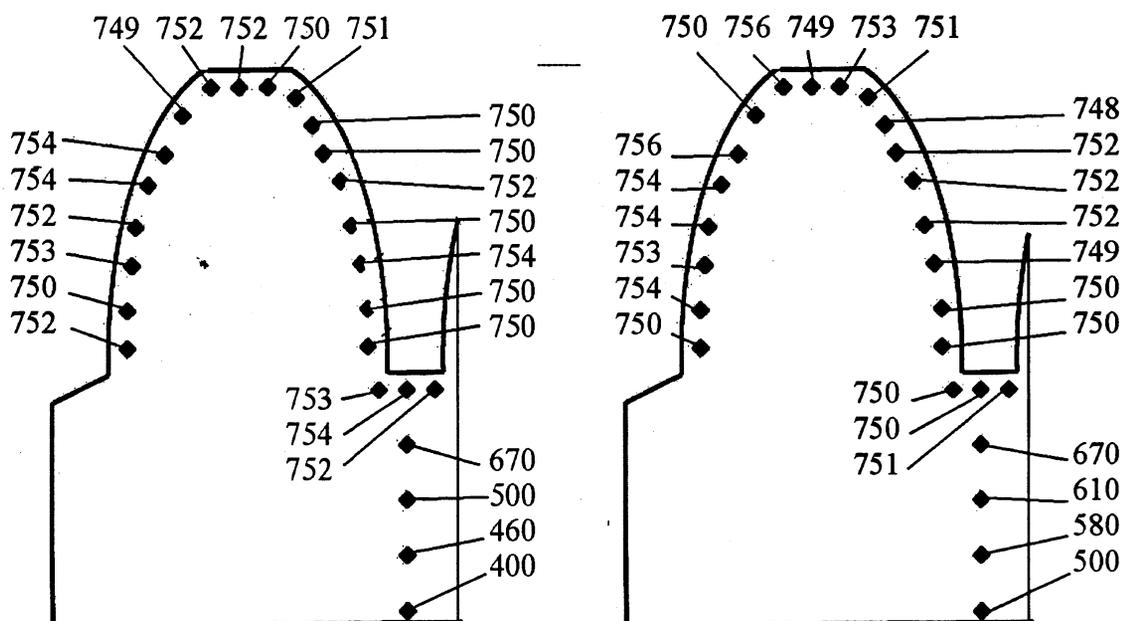


Рис. 1. Характер распределения твердости (HV) по контуру зубьев упрочненных шестерен из сталей: а – 60ПП, б – У8.

Результаты измерения распределения твердости по сечению зуба суммированы в таблице 1 (l – расстояние от поверхности). Полученные данные свидетельствуют о том, что в результате объемно–поверхностной закалки шестерня имеет однородный

упрочненный слой высокой твердости толщиной $\approx 2,5$ мм, и достаточно мягкую сердцевину.

Обратимся к результатам рентгенографических исследований. На дифрактограммах от темплетов, изготовленных из чугуна СЧ20 и ВЧ наблюдаются отражения от α -железа и довольно интенсивные линии аустенита. Количество аустенита, определенное по соотношению интегральных интенсивностей линий (111) аустенита и (110) α -железа у образца из чугуна СЧ20 составляет 26% и 40% у образца из чугуна ВЧ.

На дифрактограммах образцов из стали 20ХНЗА, 45 и 40ХН наблюдаются четкие, довольно острые линии α -железа (представляющего собой по данным металлографических исследований мелкоигльчатый мартенсит заковки) и малоинтенсивные сильно размытые отражения от остаточного аустенита. Анализ показал, что содержание остаточного аустенита у образца после цементации не превышает 7 % и 4 % у образцов из сталей 45 и 40ХН, подвергнутых объемно-поверхностной закалке.

Таблица 1

Распределение твердости по сечению зуба в направлении от его вершины до внутреннего диаметра шестерни

Сталь 60ПП		Сталь У8А		Сталь 45	
l , мм	HRC	l , мм	HRC	l , мм	HRC
2	59	2	59	2	60
4	57	4	59	4	58
7	44	7	53	7	53
10	36	10	50	10	53
13	33	13	41	13	48
15	34	15	36	15	46
17	33	17	34	17	42

На дифрактограмме от стали 60ПП наблюдаются только отражения от α -фазы, т.е. этот материал имеет мартенситную структуру с периодом решетки $a_0=0,2856$ нм. В отличие от стали 60ПП, на дифрактограмме от закаленного слоя стали У8А кроме отражения (110) α -фазы присутствует также ряд линий, принадлежащих карбидной фазе Fe_3C . Таким образом, структура упрочненной стали У8А представляет собой мартенсит с включениями частиц карбидной фазы Fe_3C . Период решетки матрицы стали У8А, измеренный по угловому положению линии (110)CoK $_{\alpha}$, равен $a_0=0,2868$ нм.

Результаты изучения триботехнических характеристик показали, что для всех исследованных материалов кривые зависимости коэффициента трения от числа циклов испытаний имеют подобный характер. Всем им характерен некоторый начальный участок, на котором происходит увеличение коэффициента трения, после чего его величина стабилизируется и в дальнейшем практически не меняется. Этот участок связан с периодом приработки, равным примерно 250 м пробега, и характеризуется интенсивным нелинейным изнашиванием.

После периода интенсивного износа процесс трения переходит в стадию установившегося изнашивания с характерной линейной зависимостью массового износа от пути трения. Величина коэффициента трения на установившейся стадии

износа у всех образцов примерно одинакова и равна 0,86-0,88, за исключением образца из чугуна СЧ20, у которого он заметно ниже и составляет 0,76.

Графики зависимости весового износа от пути трения для исследованных материалов приведены на рис. 2. Видно, что наименьший массовый износ при указанных условиях испытаний наблюдается у образца из чугуна СЧ20, а наибольший – у образца из стали 45. В промежутке между ними находятся (в порядке убывания): сталь 40ХН, сталь 20ХН3А, (цементация) и чугун ВЧ. При этом линии, характеризующие величину износа образцов из стали 20ХН3А и стали 40ХН достаточно близки друг к другу. Для большей наглядности ниже приведены цифры, характеризующие величину массового износа исследованных образцов (мг/м пути трения): сталь 20ХН3А – $1,46 \cdot 10^{-2}$, чугун СЧ20 – $0,49 \cdot 10^{-2}$, сталь 45 – $1,98 \cdot 10^{-2}$, сталь 40ХН – $1,38 \cdot 10^{-2}$, чугун ВЧ – $1,11 \cdot 10^{-2}$.

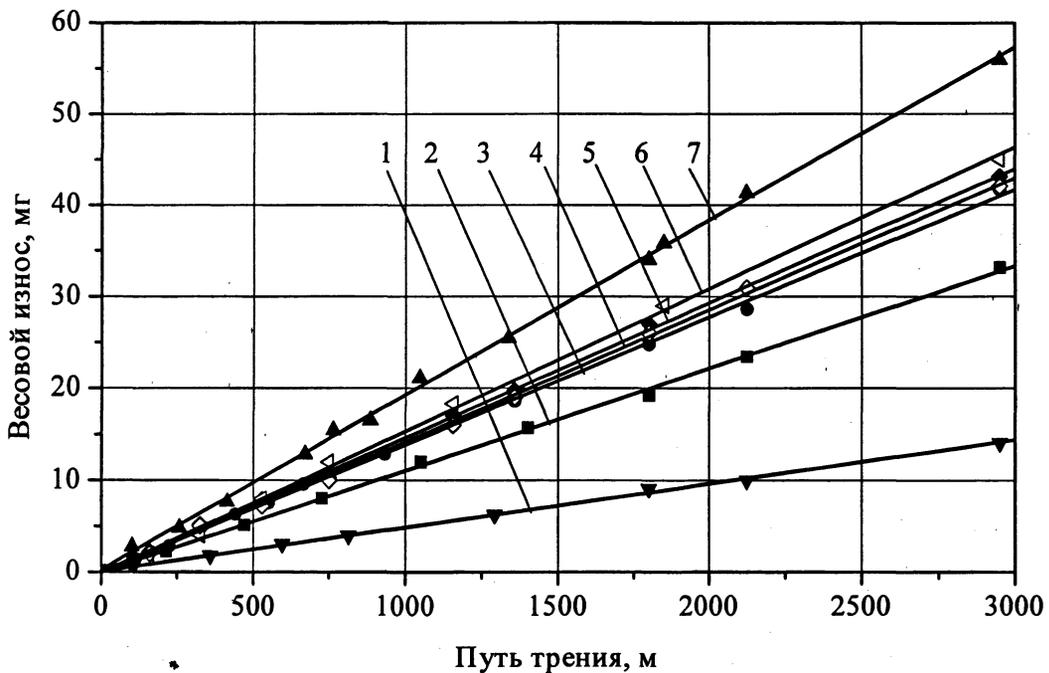


Рис. 2. Зависимость весового износа от пути трения. 1 – чугун СЧ20; 2 – чугун ВЧ; 3 – сталь У8; 4 – сталь 20ХН3А; 5 – сталь 40ХН; 6 – сталь 60ПП; 7 – сталь 45.

Таким образом, полученные данные показывают, что образцы из стали 40ХН, чугуна СЧ20 и ВЧ, упрочненные объемно-поверхностной закалкой с использованием индукционного нагрева имеют несколько большую износостойкость, чем образец из стали 20ХН3А, упрочненные цементацией с последующей закалкой. Однако здесь нужно принимать во внимание то, что речь идет лишь о триботехнических свойствах. В частности, высокие антифрикционные свойства серого чугуна хорошо известны, однако ему присущи высокая хрупкость и довольно низкая прочность, что, по всей видимости, не даст возможности применить его в качестве материала для изготовления высоконагруженных шестерен. Поэтому далее были выполнены аналогичные исследования шестерен, изготовленных из наследственно мелкозернистой стали У8А и стали пониженной прокаливаемости 60ПП. Предполагалось, что применение этих

материалов позволит более эффективно реализовать метод индукционного поверхностного упрочнения.

Из приведенных на рис. 2 данных видно, что износостойкость стали 60ПП незначительно уступает износостойкости стали У8А. В свою очередь, износостойкость этих сталей практически не отличается от износостойкости стали 20ХН3А.

Далее были проведены сравнительные стендовые испытания опытных и серийных шестерен на статическую прочность. Из полученных данных следует, что разрушение серийных шестерен происходит при величине нагружающего крутящего момента, равного 26–29 кН·м. Из всех исследованных материалов наилучшие результаты по этому критерию были получены для шестерен, изготовленных из стали 60ПП и У8А. Их разрушение произошло при величине нагружающего крутящего момента, равного 28–29 кН·м, т.е. такой же, как и для серийных шестерен.

На завершающем этапе работы были проведены динамические испытания опытных шестерен на полигоне испытательного центра УГК МАЗ. Автомобиль, нагруженный массой 11500 кг (номинальная грузоподъемность 9,7 т), испытывали в экстремальных условиях – езда по ухабам, трогание с места передним и задним ходом резким броском педали сцепления на площадке с уклоном 7%. Опытные шестерни выдержали полный цикл испытаний. При этом по динамической и статической прочности опытные и серийные шестерни оказались равнозначны.

Аналогичный результат был получен и после эксплуатационных испытаний. Ведомые шестерни главной передачи заднего моста автомобиля МАЗ 5551, изготовленные из стали У8А и ведущие шестерни колесной передачи автомобиля из стали 60ПП, упрочненные объемно–поверхностной закалкой, по износостойкости не уступают шестерням из стали 20ХН3А, упрочненным химико–термической обработкой. При этом по точности изготовления (вследствие меньшей величины коробления) экспериментальные шестерни превосходят серийные, что существенно уменьшает шумы при работе заднего моста автомобиля МАЗ. Одновременно существенно уменьшаются затраты на изготовление изделий за счет применения более дешевых материалов и сокращения длительности цикла упрочнения. Стоимость применяемой стали втрое ниже, затраты электроэнергии уменьшаются в 7 – 15 раз, длительность цикла упрочнения сокращается с 25 – 30 часов до 3 – 5 минут, термические деформации уменьшаются в 2 – 3 раза. Отпадает необходимость в использовании закалочного масла, природного газа, жаропрочных и жароупорных материалов, необходимых при цементации, устраняются вредные выбросы в окружающую среду.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гурченко П.С. Упрочнение при индукционном нагреве и управляемом охлаждении. Гомель. 1999. 236 с;
2. Головин Г.Ф., Зимин Н.В. Технология термической обработки металлов с применением индукционного нагрева. Л.: Машиностроение. 1979. 120 с;
3. Кидин И.Н. Физические основы электротермической обработки металлов и сплавов. М. Металлургия. 1969. 376 с;
4. Гурченко П.С., Быков В.М., Шумаков Ю.И. Поверхностная закалка при индукционном нагреве бортовых шестерен автомобилей МАЗ.// Металловедение и термическая обработка металлов. 1990. №6. С. 9–13.

М.И. Демин, П.С. Гурченко, А.И. Михлюк

СТАЛЬ 40Л – МАТЕРИАЛ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЙ ЛИТОЙ ДРОБИ

*Минский автомобильный завод
Минск, Беларусь*

Повышение качества обрабатываемых деталей и заготовок, срока службы технологического оборудования и инструмента при одновременном снижении затрат на производство, экономия сырьевых и топливно-энергетических ресурсов для промышленных предприятий Республики Беларусь в настоящее время входят в число приоритетных задач развития экономики страны. В литейном, кузнечном и термическом производствах существенные затраты материалов и энергии приходятся на операции очистки отливок и заготовок, которые обычно осуществляются в дробеметных камерах с применением чугунной либо стальной дроби, произведенной, как правило, на специализированных предприятиях.

Опыт показывает, что для очистки отливок наиболее эффективной является стальная дробь, которая обычно изготавливается из специальных марок сталей. Как правило это сталь либо с малым содержанием углерода (до 0,1%) либо с высоким содержанием (0,8-1,2 %). Такое резкое ограничение по содержанию углерода связано с особенностями процесса изготовления литой дроби, когда в процессе разлива и распыления жидкой струи металла происходит резкое охлаждение жидких гранул с практически мгновенной кристаллизацией и достижением интервала температур мартенситного превращения. Это, при содержании углерода в расплавленном металле в интервале 0,37- 0,51 %, что соответствует среднеуглеродистым сталям, широко применяемым в машиностроении, приводит к закалке с расплава и формированию крупноигльчатого мартенсита в структуре, что при эксплуатации приводит к разрушению гранул и как следствие этого низкой стойкости. На рис 1 показан график зависимости циклической стойкости стальной литой дроби в зависимости от содержания химических элементов полученный в результате анализа литературных источников и на основании проведенных экспериментов.

Как видно из графика, высокие эксплуатационные свойства литой дроби достигаются при содержании углерода ниже 0,1 %, а при содержании углерода в стали в интервале 0,4% стойкость гранул снижается до 200 циклов. С точки зрения циклической стойкости максимальное содержание углерода должно составлять 0,15-0,20 %. При увеличении содержания углерода до 0,6 % и выше стойкость дроби увеличивается, что может быть объяснено увеличением в структуре остаточного аустенита, благодаря которому твердость и хрупкость снижаются.

Поэтому основные производители литой дроби вынуждены применять сложное специализированное оборудование и сталь с ограничением по содержанию углерода, что приводит к увеличению стоимости выпускаемой дроби и усложнению процесса её производства.

Целью проведенной работы явилось разработка технологии и оборудования литой дроби из стали 40Л, широко применяемых на машиностроительных предприятиях РБ, для получения конкурентоспособной литой дроби.

На Минском автомобильном заводе в 2000 году освоены технология и высокопроизводительное малогабаритное оборудование для литья стальной дроби производительностью до 6.0 т/ч. Плавку стали производят в печи ДС-5МТ в