

**Д.С. СТАВРЕВ**, д.т.н., профессор факультета МТ, ТУ – Варна, Болгария  
**Ц.Д. ДИКОВА**, к.т.н., доцент факультета ДМ, МУ – Варна, Болгария

### ГЛУБИННО-ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ – МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Для упрочнения зубчатых колес используют методы термической и химико-термической обработки. При больших диаметрах и модулях химико-термическая обработка в принципе не применима. В тех случаях обычно выполняют улучшение в целом объеме до нарезки зубьев или поверхностную закалку на глубине 2-5мм для модулей свыше 7-8мм. Нами создан метод, разработано промышленное сооружение и введена в эксплуатацию технология, названная "глубинно-поверхностное упрочнение". Метод и технологию можно применять для упрочнения водимых и ведущих зубчатых колес диаметром 300-1300мм и модулем 5-12мм. Осуществляется предварительным подогревом объема колеса, газо-пламенным нагревом контура зацепления с проникновением тепла в глубину, следующим регулируемым душевым охлаждением и самоотпуском. После упрочнения твердость на поверхности достигла 32-40 HRC при глубине упрочненного слоя 15-25мм. Таким образом, долговечность зубчатых колес диаметром 1260мм и модулем  $m=9$ мм повысилась свыше 2,5 раза.

Methods of heat treatment and chemical heat treatment are usually used for gear-wheels hardening. But principally chemical heat treatment cannot be applied for gears of large diameters and modules. In these cases volume hardening following by high temperature tempering before cutting the gear teeth or surface quenching in depth of 2-5 mm for modules over 7-8mm are commonly used. We developed method, worked out equipment and implemented into production technology, called by us "in depth surface hardening". The method and technology can be used for hardening of different kinds of gear-wheels with diameters 300-1300mm and modules 5-12mm. It is realized by preliminary volume heating of the gear, gas-flame heating of the gearing contour accompanying by heat penetrating in the depth, following regulated shower cooling and self-tempering. The surface hardness after hardening reaches 32-40 HRC in depth of the hardening layer 15-25mm. Thus the life of the gear-wheels with diameter 1260mm and module  $m=9$ mm increases more than 2,5 times.

**1. Введение.** Для упрочнения зубчатых передач из конструкционных сталей обычно применяют методы термической и химико-термической обработки [1-5]. В машиностроении и автомобилестроении, в случаях серийных и массовых производств шестерен и зубчатых валов, технология цементации отвечает конструктивным требованиям. Применяют, так же, метод индукционного нагрева с последующей закалкой для достижения свойств на поверхности зацепления. При этом, удовлетворительные результаты получены при сквозном нагреве зубьев шестерен модулем до  $m=4,5$ . Для больших модулей (свыше 10) шестерни упрочняют методом индукционной закалки "по впадине" и "по фланкам". При этом, трудно избежать закалочных трещин, обычно возникающих в основании зубьев [4]. Вследствие гетерогенных деформаций нарушается геометрия зацепления, что особенно заметно при упрочнении шестерен с косыми зубьями. Для шестерен среднего модуля ( $m=5-10$ мм) и диаметра свыше 300мм применение цементации неприемлемо из-за наличия больших объемных деформаций и дорогостоящей дополнительной обработки [6]. В тяжелом машиностроении при конструировании крупных шестерен среднего и большого модуля требуется улучше-

ние (закалка с высоким отпуском) заготовки до твердости 250-300 НВ [2]. После чего следует нарезание зубьев. Достигнутые механические свойства зацепления часто являются недостаточными для достижения высокой прочности изгиба и контактной выносливости. Долговечность в данном случае недостаточна. Приходится делать периодические ремонты, которые связаны с большими затратами.

Нами разработан метод, названный "глубинно-поверхностное термическое упрочнение", создана технология и сооружение для реализации метода [7, 8]. Вследствие их применения достигнуто повышение долговечности зубчатых передач в тяжелом машиностроении. Описание метода, особенности технологии и сооружения, полученные результаты после их применения являются предметом настоящей работы.

### 2. Эксплуатационные и конструктивно-технологические основы.

Как было уже отмечено, классическое объемное улучшение и поверхностное упрочнение не являются подходящими для шестерен в большинстве случаев тяжелого машиностроения. Это относится особенно к шестерням модулями  $m=6-12$ мм и диаметрами 500-1500мм с косыми (шевронными) зубьями. Обычно эти передачи конструируют для высокоскоростных степеней больших редукторов горно-обогатительной, нефтедобывающей, геолого-разведочной, металлургической и химической промышленности. Основные требования здесь относятся к преодолению больших перегрузок крутящих моментов вместе со значительными контактными напряжениями. Это означает, что в зоне зацепления необходимо обеспечить одновременно сравнительно высокую твердость в линии контакта, достаточную прочность на изгибе в основании зубьев в сочетании с надежной ударной вязкостью.

По отношению подбора материала и технологии заготовки конструкции делаются из проката при использовании сварочного монтажа или из литой заготовки с последующей закалкой и высоким отпуском [9]. Применяют средне-углеродистую низко-легированную сталь с хорошей прокаливаемостью – 40X, 40XM, 40XMФ, 40XHM. Эти стали удовлетворительно свариваются.

В основе технологии и реализации процесса применены следующие термофизические характеристики [2].

Распределение температуры в отдельной точке нагреваемой детали:

$$T = f(r, t) \cdot K \quad (1)$$

где:  $r$  – пространственный радиус-вектор точки;  $t$  – время.

Распределение температуры в рамках объема в определенном моменте времени формирует температурное поле. Передача тепла из источника нагрева к нагреваемой поверхности в условиях конвективного теплообмена выражается формулой:

$$\Phi_{\sigma} = \alpha A (T_{\sigma} - T_k) \cdot W \quad (2)$$

где:  $\alpha$  – интегральный коэффициент теплопередачи,  $W/m^2 \cdot K$ ;  $A$  – площадь теплопередачи,  $m^2$ ;  $T_U$  – температура среды,  $K$ ;  $T_k$  – температура на поверхности детали,  $K$ .

Поток тепла в объеме нагретого материала:

$$\Phi = -\lambda \cdot \frac{A}{\delta} \cdot \Delta t, W \quad (3)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала, W/m.K;  $A$  – поверхность теплового потока,  $m^2$ ;  $\delta$  – глубина, m;  $\Delta t$  – разница температур между точками, K.

Анализ уравнения (1), (2), (3) показывает, что распределение температур в объеме упрочняемой детали зависит от геометрии детали, теплофизических свойств нагреваемого источника и среды, теплофизических свойств материала, величины поверхности теплопередачи и градиента температуры между ней и энергетическим источником (средой).

Эти рассуждения относятся к процессу нагрева и охлаждения. В этом смысле можно сказать, что достижение определенных конструктивных качеств при термическом воздействии зависит, прежде всего, от детали, интенсивности нагрева и теплоотвода от поверхности зубчатого контура. Регулировки интенсивности нагрева и охлаждения можно достичь путем изменения конструкции, расположения и интенсивности (мощности) нагревательных и охлаждающих устройств. Этот подход был воспринят нами для решения конкретной задачи метода.

**3. Сущность метода и технологии.** Предложенная и реализованная нами зависимость температура-время процесса "глубинно-поверхностного упрочнения" показана на рисунке 1. Отдельные этапы метода отличаются следующим:

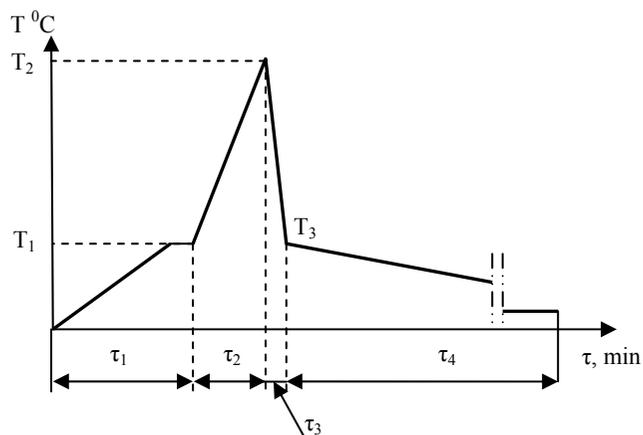


Рисунок 1 – Зависимость температура-время процесса "глубинно-поверхностного упрочнения" (схема):

$T_1$  – температура подогрева;  $T_2$  – температура нагрева для закалки контура;  $T_3$  – температура начала самоотпуска;  $\tau_1$  – время подогрева;  $\tau_2$  – время нагрева для закалки контура;  $\tau_3$  – время охлаждения при закалки;  $\tau_4$  – время самоотпуска.

Этап 1 – предварительный подогрев целого объема до выбранной температуры самоотпуска, который осуществляется печным или газопламенным способом. Температура и время зависят от конструкции – конфигурации, материала, требований к твердости и глубине слоя. Контроль температуры осуществляется контактным или инфракрасным термометром.

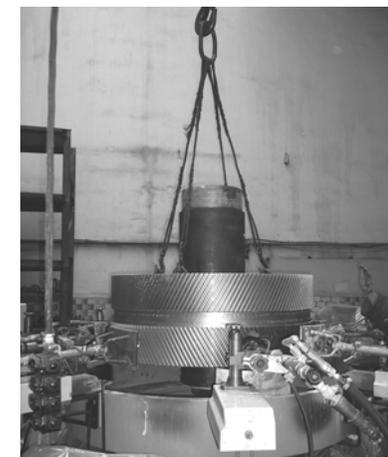


Рисунок 2 – Погружение установки

Этап 2а – установка детали (после печного нагрева) на сооружении (рисунок 2). Если подогрев осуществляется газопламенными горелками, установка проводится в начале процесса. При этом, обязательно следует сделать расстановку горелок и охлаждающих устройств по обрабатываемому контуру. Она сопровождается наладкой тепловой мощности нагрева и охлаждаемой мощности отвода тепла.

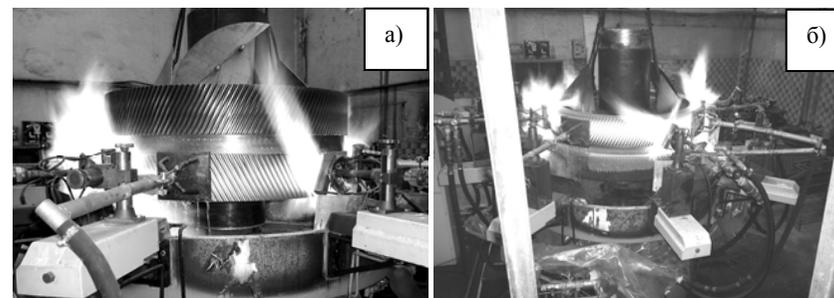


Рисунок 3 – Нагрев нижней – а) и верхней – б) полос двуполосатого шестерни шевронного зацепления

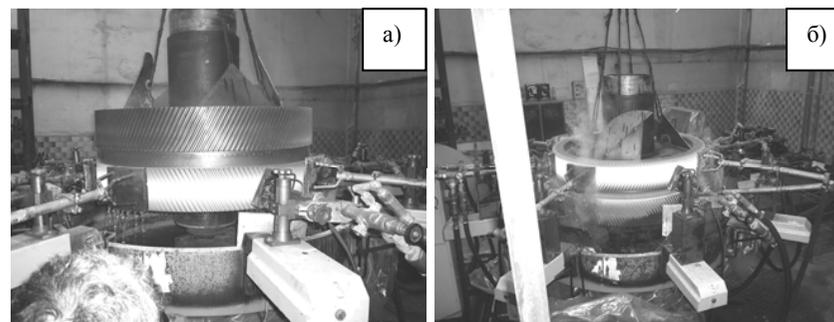


Рисунок 4 – Остановливание нагрева нижней – а) и верхней – б) полос шестерни

Этап 2б – нагрев контура зацепления до аустенитизации (рисунок 3). Продолжительность нагрева зависит от количества горелок и их расположения, тепловой мощности, площади теплообмена, выбранной температуры аустенитизации.

Этап 3 – останавливание нагрева, выдержка для выравнивания температур по площади контура (рисунок 4). Включается охлаждение водными душами. Продолжительность охлаждения зависит от дебита жидкости и охлаждаемой поверхности и массы (рисунок 5).

Этап 4 – останавливание охлаждения и начало самоотпуска за счет теплопереноса из сердцевины шестерни (рисунок 6). Самоотпуск гарантирует отсутствие трещин зубчатого контура [9]. Его продолжительность зависит от температуры, условий нагрева и охлаждения, конфигурации и массы шестерни. Можно продолжить его за счет дополнительно вводимого тепла горелок малой мощности. Практически можно осуществить отпуск для коррекции твердости.

Процесс упрочнения двухполосных шестерен шевронного зацепления осуществляют в два этапа. Сначала упрочняют нижний контур, потом верхний (рисунок 3а и 3б). Шестерня шевронного зацепления модулем  $m=9\text{mm}$ ,

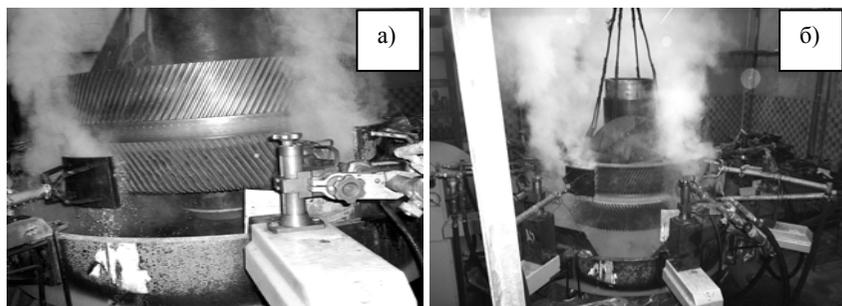


Рисунок 5 – Охлаждение нижней – а) и верхней – б) полос шестерни



Рисунок 7 – Шестерня после упрочнения

Рисунок 6 – Останавливание охлаждения. Самоотпуск. Контроль температуры

диаметром 1260mm (рисунок 7) после упрочнения показала следующие результаты контроля: твердость поверхности зубьев 32-38 HRC, глубина упрочненного слоя (до твердости основного материала) 20-25mm.

**4. Промышленное сооружение.** Принципиальная схема сооружения показана на рисунке 8. Конструкция позволяет осуществить следующие возможности: упрочняемый диаметр – до 1300mm, высота упрочненной зоны при одно кратном нагреве (одним переходом) до 350mm, масса детали – до 2800kg. Вертикальный и установочный ход горелок и душевых устройств – 250mm. Максимальное число горелок – 8, максимальное число душевых устройств – 6. Скорость кручения основного вала – до  $20\text{min}^{-1}$ , регулируется бесступенно. Генерированная максимальная тепловая мощность горелок – 350 kW. Дебит охлаждающей системы – до  $250\text{dm}^3/\text{min}$ . Инсталлированная электрическая мощность (3x350V) – 3,5kW. Природный газ магистральный –  $P_n=0,3-0,5$  Мпа. Кислород магистральный технический –  $P_n=0,5-0,6$  Мпа. Воздух магистральный  $P_n=0,3-0,4$  Мпа. Охлаждаемая вода промышленная, механически фильтрованная  $P_n=0,5-0,7$  Мпа.

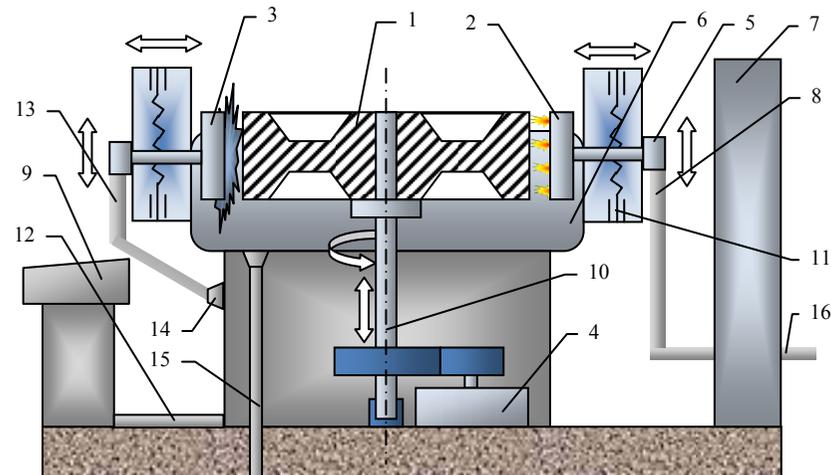


Рисунок 8 – Сооружение глубинно-поверхностного упрочнения (схема). 1-Обрабатываемая деталь; 2-Газо-кислородные горелки; 3-Душ охлаждения; 4-Задвижка кручения; 5-Кислородно-газовый инжектор; 6-Ванна отвода охлаждающей жидкости; 7-Шкаф регулировки рабочих газов; 8- Трубопроводы газовых потоков; 9-Пульт электроуправления; 10-Вал установочный; 11-Узел установки и передвижения горелок и душей; 12-Кабели электроуправления; 13-Шланг подвода воды; 14-Узел регулировки и управления охлаждающей жидкости; 15-Трубопровод отвода жидкости; 16-Трубопроводы технологических газов

**5. Результаты промышленного внедрения.** Метод и технология внедрены на заводе "Вапрес" в городе Плевен, Болгария. Упрочнены около 300 деталей тяжелого машиностроения. Реализация технологии на шестерни редуктора ленто-транспортной магистрали горно-добывающей промышленности позволило продлить срок эксплуатации до 2,5 раза.

**Выводы.** Разработанный метод для "глубинно-поверхностного упрочнения", технология и сооружение для их реализации позволило решить проблему упрочнения и повышения долговечности больших шестерен модулем до 12mm и диаметром до 1300mm. Метод реализуется предварительным подогревом, нагревом для закалки регулируемые газопламенными горелками, охлаждением регулируемые водными душевыми устройствами и следующим самоотпуском. Полученные твердость поверхности зацепления 32-38 HRC и глубина упрочненного слоя 20-25mm удовлетворяют конструктивные требования для новых и восстановленных шестерен. Применение этой технологии в реальных условиях повысило долговечность контура зацепления до 2,5 раза.

**Список литературы:** 1. *Warnecke H.-J.*, Einführung in die Fertigungs technik, B.G. Teubnet, Stuttgart, – 1993. – 428s. 2. *Technologie der Wärmebehandlung von Stahl*, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig. – 1987. – 672s. 3. *Большаков В.И., Долженков И.Е. и др.* Технология термической и комбинированной обработки металлопродукции. – Днепропетровск: Gaideamus, 2002. – 386с. 4. *Головин Г.Ф., Зимин Н.В.*, Технология термической обработки металлов с применением индукционного нагрева. – Ленинград: Машиностроение, 1990. – 87с. 5. *Friedrich*, Tabellenbuch Metall- und Maschinentechnik. – Ümmler Bonn, 1993. 6. *Лалев Б.И.*, Абразивная обработка металлов композитными дисками: Автореферат диссертации для присуждения ученой степени "кандидат технических наук". – Варна, 2005. 7. *Ставрев Д., Дикова Ц.*, Неконвенционална технология за термично обработване на инструменти и детайли // "Машины, технологии, материали". – 4-5, 2008. – С.30-32; 8. *Stavrev D., Dikova, Ts.*, Method for in depth surface thermal hardening // VI International Congress "Machinery, Technologies, Materials" MTM 2009, February 18-20, 2009. – Sofia, Bulgaria. – Vol.2. – P.5-8. 9. *Ставрев Д., Тонев Б., и др.*, Повърхностно дълбочинно уякчаване на ходови кола на подемно-транспортни машини // Машиностроене и електротехника. – 2006, №4-5. – С.132-135.

*Поступила в редколлегию 20.04.09*

УДК 621.83

**В.Е. СТАРЖИНСКИЙ**, ИММС им. В.А. Белого НАН Беларуси  
**В.Л. БАСИНЮК**, д.т.н., ОИМ НАН Беларуси  
**Е.И. МАРДОСЕВИЧ**, к.т.н., ОИМ НАН Беларуси  
**В.Ф. ХИЖЕНОК**, научный сотр. ИММС им. В.А. Белого НАН Беларуси

## **МНОГОПОТОЧНАЯ ПЛАНЕТАРНАЯ ПЕРЕДАЧА ЭКСЦЕНТРИКОВОГО ТИПА: РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

Проанализовано геометрию планетарных багатопоточных зубчатых передач с малыми числами зубцов. Представлено технологию розрахунку геометрії зубців.

Geometry of epicyclic gear train of internal meshing with small tooth number difference between the ring gear and planet one, providing high gear ratio, is analyzed. Schematic diagram of eccentric gear train, containing the ring gear and movable output gear, both with internal teeth, and double-rim planet gears is considered. The technique of gearing geometry calculation and methodology of development of multipower-path planetary eccentric drive with double-rim planet gears are presented.

**Постановка проблемы.** Планетарные зубчатые передачи эксцентрикового типа широко используются в приводах разнообразных машин и механизмов благодаря возможности реализации больших передаточных отношений при высоких показателях массо-габаритных характеристик. Проблемы интерференции профилей зубьев, возникающие при создании передач внутреннего зацепления с минимальной разностью зубьев опорного колеса и сателлита, решаются разными способами, в том числе введением промежуточного сателлита, обеспечивающего передачу вращения от ведущего вала с эксцентриком через опорное колесо подвижному колесу выходного вала. Данная схема может быть усовершенствована установкой не одного, а нескольких промежуточных сателлитов, равномерно расположенных на орбите водила, что исключает присущий данной передаче дисбаланс и повышает ее несущую способность.

**Анализ литературы.** В планетарных эксцентриковых приводах используются передачи внутреннего зацепления, расчет геометрии которых регламентируется ГОСТ 19274-73. Малая разность зубьев  $z_d$  опорного колеса и сателлита позволяет реализовать высокие передаточные отношения, при  $z_d=1$  передаточное число  $u$  равно числу зубьев опорного колеса  $z_3$ . Для данного варианта передачи задача расчета сводится, в основном к выбору соответствующих коэффициентов смещения, обеспечивающих исключение интерференции профилей и необходимые качественные показатели [1, 2].

В работах авторов [3] показано, что приемлемое с точки зрения удовлетворения вышеназванным условиям решение состоит в создании передачи внутреннего зацепления, сателлит которой имеет постоянный коэффициент