

$$Y_3 = h = 249,1 + 82X_1 + 43,1X_2 - 30,3X_1^2 - 21,9X_2^2, \quad (3)$$

из которого видно, что в этом случае время обработки (X_1) оказывает большее влияние на глубину диффузионного слоя, чем температура (X_2), но их влияние не однозначно из-за больших значений коэффициентов со знаком "минус" у квадратичных членов. Максимальная глубина слоя $h = 330$ мкм будет получена при времени обработки 5 ч ($X_1 = +1$) и температуре 590°C ($X_2 = +1$).

Таким образом, применение методов математического планирования эксперимента позволило получить адекватные модели процессов диффузионного насыщения конструкционных сталей и оптимизировать условия получения максимальной твердости и глубины упроченного слоя в этих материалах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. М.: Финансы и статистика, 1981.
2. Каледин Б.А. Планирование экспериментов в порошковой металлургии. Ч. II. Планы второго порядка. Мн., 1982.
3. Finnmern V. Anderungen der eigenschaten der bauteiloberfloche durch badnitrieren. Bd, 24: S.3-6.

УДК 621.785.532.

И. Г. Довгялло, доцент;
Б. А. Каледин, доцент;
А. И Сурус, ст. препод.;
С. Е. Бельский, доцент

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА КАЧЕСТВО ДИФФУЗИОННОГО СЛОЯ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КАРБОНИТРАЦИИ

Data about the influence of mechanical vibrations were introduced in the melt of sodium cyanate in the process of chemical and thermal treatment on the characteristics of hardened layer of steels are presented.

Одним из наиболее простых и доступных способов повышения ресурса быстроизнашивающихся деталей машин и механизмов лесной и деревообрабатывающей промышленности, инструмента и техноло-

гической оснастки является их диффузионное насыщение легирующими элементами. Хорошо себя зарекомендовал процесс низкотемпературной карбонитрации, характеризующийся отсутствием остаточных деформаций даже тонкостенных деталей, малым временем и низкой температурой обработки, что делает его весьма экономичным. Кроме того, он позволяет улучшить антикоррозионные свойства упрочненного слоя, что также важно для многих механизмов лесных машин. Однако широкому внедрению в производство данного процесса препятствуют недостаточная глубина, твердость и износостойкость поверхностного слоя, а также низкая эффективность обработки труднодоступных участков деталей машин.

В проведенных ранее исследованиях показано, что использование механических колебаний, вводимых как в расплав, так и в образец, обеспечивает интенсификацию процесса диффузионного насыщения [1], однако влияние частоты колебаний и способа обработки на качество упрочненных поверхностей деталей из различных конструкционных сталей изучено недостаточно.

Для выявления роли механических колебаний в повышении эксплуатационных свойств упрочняемых деталей были проведены с использованием математического планирования экспериментов исследования процесса упрочнения образцов из сталей 45, 40Х, 65Г и 30ХГТ, широко применяемых для изготовления ответственных деталей машин. Вводились механические колебания частотой 3 и 18 кГц. В качестве показателей (параметров оптимизации), характеризующих свойства упрочненного слоя, были выбраны твердость HV и общая толщина этого слоя, а в качестве факторов – частота механических колебаний (3 и 18 кГц), способ подвода колебаний (в образец, в расплав), время насыщения (1, 2 и 3 ч), марка стали (45, 40Х, 65Г, 30ХГТ) и температура обработки (530, 560 и 590°С). Для проведения экспериментов использовались различные планы.

В первой серии опытов на образцах из стали 40Х изучали влияние частоты колебаний, способа их подвода и времени обработки (0,5; 2,5 и 4,5 ч) на твердость упрочненного слоя при температуре 570°С.

Матрица плана и результаты измерений твердости приведены в таблице.

Матрица плана 2х3х3

№	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ ²	X ₂ ²	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅
1	-	-	-	+	+	+	+	+	511,5	507,7	307,7	71,4	70
2	0	-	-	0	0	+	0	+	530,8	527,4	346,2	85,7	99,4
3	+	-	-	-	-	+	+	+	538,5	538,5	390,5	108,6	119
4	-	0	-	0	+	0	+	0	630,8	603,9	380,9	252,9	233
5	0	0	-	0	0	0	0	0	657,7	630,8	423,2	274,3	272,4
6	+	0	-	0	-	0	+	0	677,0	646,2	473,3	291,4	295,1
7	-	+	-	-	+	-	+	+	600,0	553,9	330,8	305,7	273,0
8	0	+	-	0	0	-	0	+	638,5	580,8	384,7	337,1	331,1
9	+	+	-	+	-	-	+	+	653,9	524,4	419,4	371,4	347,6
10	-	-	+	+	-	-	+	+	520,4	508,0	405,8	71,4	70
11	0	-	+	0	0	-	0	+	545,4	541,5	450,0	108,2	113,6
12	+	-	+	-	+	-	+	+	557,7	551,3	480,9	137,1	134,9
13	-	0	+	0	-	0	+	0	642,4	604,0	480,9	252,9	233,0
14	0	0	+	0	0	0	0	0	673,3	639,2	523,2	293,1	286,1
15	+	0	+	0	+	0	+	0	688,5	663,4	577,1	311,4	309,5
16	-	+	+	-	-	+	+	+	617,3	554,0	442,4	305,7	273,0
17	0	+	+	0	0	+	0	+	647,0	590,0	484,7	363,1	352,9
18	+	+	+	+	+	+	+	+	661,6	600,0	525,1	400,0	370,0

В этой таблице Y₁ – экспериментальное значение твердости HV; X₁; X₂; X₃ – кодированные уровни частоты, времени насыщения и способа подвода колебаний. Ошибка воспроизводимости опытов S₇ составляла 3,8 HV (0,6 % от среднего значения Y).

После обработки результатов эксперимента по методике работы [2] и проверки значимости коэффициентов уравнения была получена адекватная модель вида

$$Y = 666,4 + 21,2X_1 + 51,2X_2 + 6,4X_3 - 74,6X_2^2 - 7,1X_1^2. \quad (1)$$

Из этого уравнения видно, что наибольшее влияние на твердость оказывает время насыщения (X₂), а также частота колебаний (X₁). Влияние способа подвода колебаний (X₃) в несколько раз

меньше.

Максимальная твердость $Y_1 = 688,5$ HV получена при частоте колебаний 18 кГц ($X_1 = +1$), времени насыщения 2,5 ч ($X_2 = 0$) и подводе колебаний в образец ($X_3 = +1$).

Дальнейший анализ уравнения (1) при $X_1 = +1$ (18 кГц) и $X_3 = +1$ (подвод колебаний в образец) позволяет получить зависимость твердости от времени насыщения (X_2) в виде параболы

$$Y_1 = 686,9 + 51,2X_2 - 76,4X_2^2 \quad (2)$$

с точкой перегиба $X_{2e} = 51,2 / 2 \cdot 76,4 = 0,335$ (3,2 ч), в которой $Y_s = 695,5$ HV.

Таким образом, оптимальными условиями для получения максимальной твердости при подводе колебаний в образец будут частота 18 кГц и время насыщения 3,2 ч.

Исследование влияния тех же трех факторов на твердость поверхностного слоя образцов из стали 30ХГТ, проведенное по тому же плану эксперимента $2 \times 3 \times 3$, позволило получить адекватное уравнение (при ошибке опыта $S_2 = 5,8$ HV, т. е. 1 % от среднего значения твердости) вида

$$Y_2 = 637,2 + 22,1X_1 + 24,7X_2 + 4,2X_3 + 3,5X_1X_3 - 7,5X_1^2 - 78,5X_2^2. \quad (3)$$

Из уравнения видно, что и в этом случае наибольшее влияние оказывает время насыщения (X_2). Влияние способа подвода колебаний (X_3) и частоты колебаний (X_1) существенно меньше. Оптимальными условиями для получения высокой твердости поверхностного слоя (660 HV) будут режимы опыта № 15: $X_1 = +1$ (18 кГц); $X_2 = 0$ (2,5 ч) и $X_3 = +1$ (подвод колебаний в образец), то есть те же условия, что и для стали 40Х. Следует отметить, что различие между твердостью сталей 40Х и 30ХГТ невелико, в пределах 5 %. Таким образом, введение колебаний частотой 18 кГц в образец способствует существенному росту твердости поверхностного слоя обеих марок стали.

В следующей серии опытов исследовали влияние марки стали (45 и 65Г), времени (0,5; 2,5 и 4,5 ч) и температуры насыщения (530, 550 и 570°C) на величину твердости (Y_2) при введении колебаний частотой 18 кГц в образец. Матрица плана $2 \times 3 \times 3$ и результаты измерения твердости HV приведены в табл. (последний столбец Y_3) с использованием двух уровней марки стали (45 и 65Г), трех уровней времени (0,5; 2,5 и 4,5 ч) и трех – температуры насыщения (530, 550 и 570°C). В данной таблице X_1 – температура; X_2 – время; X_3 – марка стали; Y_3 –

экспериментальное значение твердости HV. После обработки результатов эксперимента было получено адекватное уравнение регрессии (при ошибке воспроизводимости $S_2 = 3,5$ HV (менее 1% от среднего значения твердости 435 HV)).

$$Y_3 = 476,9 + 43,2X_1 + 17,2X_2 + 50,8X_3 - 62,4X_2^2. \quad (4)$$

Максимальное значение твердости $Y_3 = 571$ HV получено при $X_1 = +1$ ($T=570^\circ\text{C}$), $X_2 = 0$ (2,5 ч) и $X_3 = +1$ (сталь 65Г). Для стали 45 ($X_3 = -1$) уравнение (4) будет следующим:

$$Y_3 = 426,1 + 43,2X_1 + 17,2X_2 - 62,4X_2^2. \quad (4a)$$

Максимальная твердость данной стали равна 469,3 HV при температуре 570°C ($X_1 = +1$) и времени насыщения 2,5 ч ($X_2 = 0$). Для стали 65Г ($X_3 = +1$) уравнение (2) преобразуется в следующее выражение:

$$Y_3 = 527,7 + 43,2X_1 + 17,2X_2 - 64,2X_2^2. \quad (4б)$$

Максимальная твердость для этой стали будет равна 571 HV при температуре 570°C и времени насыщения 2,5 ч. Как видно из полученных уравнений (1), (2), (3) и табл., наиболее высокая твердость при одинаковых условиях диффузионного насыщения ($T = 570^\circ\text{C}$, $\tau = 2,5$ ч, $f=18$ кГц при вводе колебаний в образец) получена на стали 40X (690 HV).

Влияние частоты колебаний, времени насыщения и способа подвода колебаний на глубину диффузионного слоя сталей 45 и 40X изучили с помощью того же плана эксперимента $2 \times 3 \times 3$. Колебания подводили в расплав и в образец, частота их составляла 3 и 18 кГц, а время насыщения - 0,5; 2,5 и 4,5 ч. Результаты измерения глубины диффузионного слоя в мкм приведены в табл. в колонках Y_4 и Y_5 , где Y_4 - глубина слоя для стали 45, Y_5 - для стали 40X, а X_1 , X_2 , X_3 - кодированные уровни частоты колебаний, времени насыщения и способа подвода колебаний. Ошибки воспроизводимости опытов соответственно были $S_4 = 6,9$ мкм (3 % от среднего значения) и $S_5 = 4,2$ мкм (2% от среднего значения). После обработки результатов опытов и проверки значимости коэффициентов получены адекватные модели для стали 45

$$Y_4 = 281,7 + 30,7X_1 + 125X_2 + 8X_3 + 4,8X_1X_2 + 6,4X_1X_3 - 57,2X_2^2 \quad (5)$$

и для стали 40X

$$Y_5 = 281,7 + 35,3X_1 + 111,7X_2 + 5,7X_3 + 4,8X_1X_2 + 4,4X_1X_3 - 15,3X_1^2 - 58,7X_2^2. \quad (6)$$

Из этих уравнений видно, что наибольшее влияние на глубину диффузионного слоя оказывает время насыщения (X_2), а роль частоты колебаний (X_1) и способа их подвода (X_3) значительно меньше. Максимальную глубину слоя можно получить в условиях, когда все три фактора установлены на верхних уровнях, то есть при частоте колебаний 18 кГц ($X_1 = +1$), времени насыщения 4,5 ч ($X_2 = +1$) и подводе колебаний в образец ($X_3 = +1$). Для стали 45 она будет примерно 400 мкм, а для стали 40X - 370 мкм.

Таким образом, применение колебаний способствует повышению толщины упрочненного слоя этих сталей. Несколько меньшая глубина этого слоя у стали 40X по сравнению со сталью 45 объясняется тем, что легирование стали препятствует более интенсивной диффузии.

Между глубиной диффузионного слоя (Y_5) и его твердостью (Y_1) существует тесная корреляционная связь. Коэффициент парной корреляции $r_{1,5}$ рассчитан по данным табл. с использованием формулы

$$r_{1,5} = \frac{\sum_1^N \Delta Y_1 * \Delta Y_5}{\sqrt{\sum_1^N \Delta Y_1^2 * \sum_1^N \Delta Y_5^2}}, \quad (7)$$

где ΔY_1 и ΔY_5 - соответственно разность между текущими и средним значениями в каждой строке матрицы твердости и глубины слоя (для стали 40X).

Использование такой зависимости позволяет, например, по величине поверхностной твердости HV прогнозировать глубину диффузионного слоя.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что наибольшее влияние на твердость и глубину диффузионного слоя оказывает время насыщения. Вместе с тем, ввод в образец колебаний высокой частоты (18 кГц) позволяет существенно (в 1,35 раза) увеличить эти параметры для всех исследованных сталей (45, 40X, 30ХГТ и 65Г). Уравнения регрессии, устанавливающие связь между твердостью, глубиной диффузионного слоя и исследуемыми факторами (способ подвода колебаний, их частота, время и температура насыщения), позволили оптимизировать процесс карбонитрации с целью получения высокой твердости (600-660 HV) и глубины диффузионного слоя (370 – 400 мкм). Корреляционные уравнения, устанавливающие тесную связь между глубиной слоя и поверхностной твердостью, позволяют прогнозировать глубину слоя по величине твердости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сурус А.И., Урбанек Ж.М., Пуровская И.И., Ольшевский А.Ф. Влияние частоты механических колебаний на содержание компонентов в расплаве азотсодержащих солей и диффузию азота в сталь при ХТО// Труды БГТУ Вып.2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность.-Мн.,1994. - С.158-161.
2. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. - М.: Финансы и статистика, 1981.

УДК 621.185.532.

А. В. Новицкий, аспирант;
Ф. Ф. Царук, доцент;
А. Н. Юргилевич, студент

**К РАСЧЕТУ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ БАЛОЧНЫХ
ОБРАЗЦОВ-МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ РАБОЧИХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

The results of theoretical and experimental investigations of the intense state of bar specimens under cyclic symmetric bending in conditions of normal and heightened temperatures are submitted.

Ленточнопильные станки находят все большее распространение в Республике Беларусь благодаря рекордным скоростям подачи, высокому качеству поверхности пиломатериалов, отсутствию больших сил инерции в узлах станка, возможности индивидуальной распиловки бревен и т.д. Среди причин, тормозящих внедрение в деревообрабатывающую промышленность РБ ленточнопильного оборудования, существенное место занимает низкая надежность пильных полотен, обусловленная выходом их из строя по причине циклических повреждений. Особенно актуальной становится проблема повышения циклической прочности дорогостоящих, в основном импортируемых, ленточных пил для многопильных станков [1].

Правильный выбор марки материала пилы, режимов термообработки и сварки, переточки и отдыха полотна невозможен без экспериментального определения влияния вышеперечисленных факторов на усталостную прочность материала пил. Известно, что усталостные испытания отличаются повышенной длительностью и трудоемкостью, поэтому для снижения трудозатрат и существенного сокращения времени проведения испытаний, особенно при больших базах, весьма