

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-9-64-71

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ НАКЛЕПАННОГО СЛОЯ ПРИ ЦЕНТРОБЕЖНОМ ОБКАТЫВАНИИ МАЛОЖЕСТКИХ ВАЛОВ

© Семен Азикович Зайдес, Андрей Владимирович Горбунов

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия; e-mail: zsa@istu.edu

Статья поступила 14 февраля 2017 г.

Рассмотрены вопросы повышения качества мало жестких валов. Исследовано напряженное состояние их поверхностного слоя. Глубина упрочнения, величина и распределение остаточных напряжений в поверхностном слое оказывают непосредственное влияние на геометрическую стабильность валов. Основная задача упрочнения — обеспечение однородности напряженного состояния в объеме тела. Предложена новая конструкция обкатника центробежного типа для эффективного упрочнения мало жестких валов. Введено понятие зоны взаимного влияния. Представлены расчетные зависимости для формирования оптимальной глубины упрочненного слоя мало жестких валов. Изложены результаты экспериментальных исследований по определению глубины упрочнения в зависимости от частоты вращения центробежного обкатника. Результаты исследований показали, что качество обработки не жестких валов центробежным обкатником зависит от свойств и толщины зоны взаимного влияния, которая определяется средним размером зерна микроструктуры. Разработанная конструкция центробежного обкатника обеспечивает неизменность рабочего усилия, стабильность деформации и напряжений по длине упрочняемой заготовки. Теоретически и экспериментально подтверждена рациональная глубина упрочнения поверхностного слоя не жестких валов при отделочно-упрочняющей обработке поверхностным пластическим деформированием (ППД). Она не должна быть больше размера зоны взаимного влияния.

Ключевые слова: мало жесткий вал; центробежный обкатник; зона взаимного влияния; глубина упрочнения; микротвердость; шероховатость.

DETERMINATION OF THE DEPTH OF HARDENED LAYER AFTER CENTRIFUGAL ROLLING OF LOW-RIGID SHAFTS

© Semen A. Zaides, Andrew V. Gorbunov

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia; e-mail: zsa@istu.edu

Submitted February 14, 2017.

The issues regarding improving the quality of low-rigid shafts are considered through studying the stressed state of their surface layer. The depth of hardening, value and distribution of the residual stresses in the surface layer have a direct impact on the geometrical stability of low-rigid shafts. The main goal of hardening consists in providing the uniformity of the stressed state in the bulk. A novel design of a centrifugal roller is proposed to ensure effective hardening of low-rigid shafts. A notion of a mutual impact zone is introduced. Theoretical dependences providing determination of the optimal depth of the hardened layer of low-rigid shafts are presented. The experimental results regarding determination of the hardening depth as a function of the rotational frequency of a centrifugal roller are presented. The experimental data show that the quality of treating low-rigid shafts with a centrifugal roller depends on the characteristics and thickness of the mutual impact zone, which is determined by the average grain size of the microstructure. The developed design of a centrifugal roller provides an unchanged value of the working force, stability of deformation and stresses along the workpiece length. The optimal depth of hardening of the surface layer of low-rigid shafts attained upon finishing-hardening by surface plastic deformation (SPD), which is proved both theoretically and experimentally, should not exceed the size of the mutual impact zone.

Keywords: low-rigid shaft; centrifugal roller; mutual impact zone; depth of hardening; micro-hardness; roughness.

Создание новых конструкционных материалов с повышенной прочностью и стремление к экономии металлических материалов приводят к увеличению номенклатуры класса мало жестких из-

делий. Малая изгибная жесткость стержневых деталей вызывает существенные проблемы при их обработке и сборке, поэтому такие детали обычно являются нетехнологичными.

Для снижения прогибов при механической обработке приходится уменьшать частоту вращения заготовки и глубину резания, что автоматически приводит к снижению производительности труда и повышению длительности технологического процесса обработки.

Среди отделочно-упрочняющих методов обработки деталей машин достаточно широкое распространение на производстве получили процессы поверхностного пластического деформирования (ППД). Если первоначально ППД использовали как отделочную операцию, снижающую шероховатость поверхности, то в настоящее время этот вид обработки применяют для упрочнения поверхностного слоя [1], правки цилиндрических деталей [2], восстановления изношенных поверхностей [3], декоративной отделки деталей [4], повышения изгибной жесткости валов [5] и ряда других технологических задач. Обработка деталей пластическим деформированием поверхностного слоя позволила получить хорошие эксплуатационные показатели: повышены качество поверхности, прочность, износостойкость, герметичность и пр. [6 – 9].

Среди параметров, характеризующих качество поверхностного слоя, важное место занимает глубина упрочненного слоя, которая для различных условий обработки может принимать значение от 0,02 до 0,1 диаметра детали. Практическое определение этой величины связано с необходимостью выполнения большого количества замеров твердости на поперечных и продольных шлифах или на шлифах с косым срезом. Очевидно, что такая методика значительно усложняет выбор оптимальных технологических параметров процесса [10]. Следует также отметить, что усталостная прочность деталей зависит и от способов деформационного упрочнения, которые формируют поверхностные слои разного качества [8, 11].

Кроме определения глубины упрочненного слоя по измерению микротвердости, используют анализ искажений микроструктуры, а также аналитические методы расчета [8, 12 – 14]. К настоящему времени накоплен достаточно большой объем информации по методам определения глубины поверхностного слоя, но при разработке новых процессов поверхностного деформирования имеющихся данных обычно недостаточно для оценки качества упрочненных деталей.

Цель данной работы — определение оптимальной глубины упрочненного слоя при центробежном поверхностном пластическом деформировании маложестких деталей типа валов.

Упрочняющая обработка обкатником центробежного типа. Механическая обработка длинномерных валов для получения качествен-

ных деталей связана с большими технологическими проблемами. Основной причиной низкого качества обработки является кинематика процесса. При вращении длинные и тонкие детали за счет центробежных сил изгибаются даже при отсутствии деформирующих усилий. Изгиб обрабатываемых участков не позволяет получать детали необходимого качества и заданной точности.

Выбор конструкции деформирующего инструмента определялся основными качественными показателями обработки поверхностного слоя. Однородность упрочнения, отсутствие изогнутости, малая величина остаточных напряжений, их уравновешенность и равномерная релаксация во время эксплуатации и другие показатели связаны с величиной усилия прижима инструмента. Инструмент должен обеспечивать постоянство этого усилия при любых изменениях формы детали, наличии пространственной погрешности и колебаний в технологической системе. Чтобы избавиться от ряда проблем, обусловленных динамикой процесса, необходимо исключить вращение детали, вывести ее из непосредственного взаимодействия с патроном, задней бабкой и люнетами. В этом случае для обеспечения обработки ППД всей поверхности нежесткого вала необходимо вращать инструмент. Для исключения деформации изгиба заготовки усилием прижима деформирующего элемента необходим инструмент с полным силовым замыканием.

Для обработки нежестких валов требуется инструмент с высокой стабильностью рабочего усилия при простой конструкции, высокопроизводительный, не требующий значительных затрат времени на настройку величины усилия при значительном изменении диаметра вала. Для этого рабочее усилие должно зависеть от минимального количества факторов. Весьма перспективна идея использования в обкатниках центробежной силы инерции.

Для решения изложенной проблемы предложена функциональная инверсия объектов технологического процесса. Вращательное движение заготовки заменено на линейное перемещение вдоль оси, а поступательное перемещение рабочего инструмента преобразовано во вращательное. Предложенная схема обработки реализована в конструкции центробежного обкатника [15], в которой контролируются только два фактора — радиус вращения и угловая скорость. Наиболее простым решением проблемы увеличения рабочего усилия, генерируемого центробежной силой, является рычаг, на котором закрепляют деформирующий элемент и груз (рис. 1).

Вся система вращается относительно неподвижной оси заготовки, и сила инерции груза создает момент относительно точки закрепления

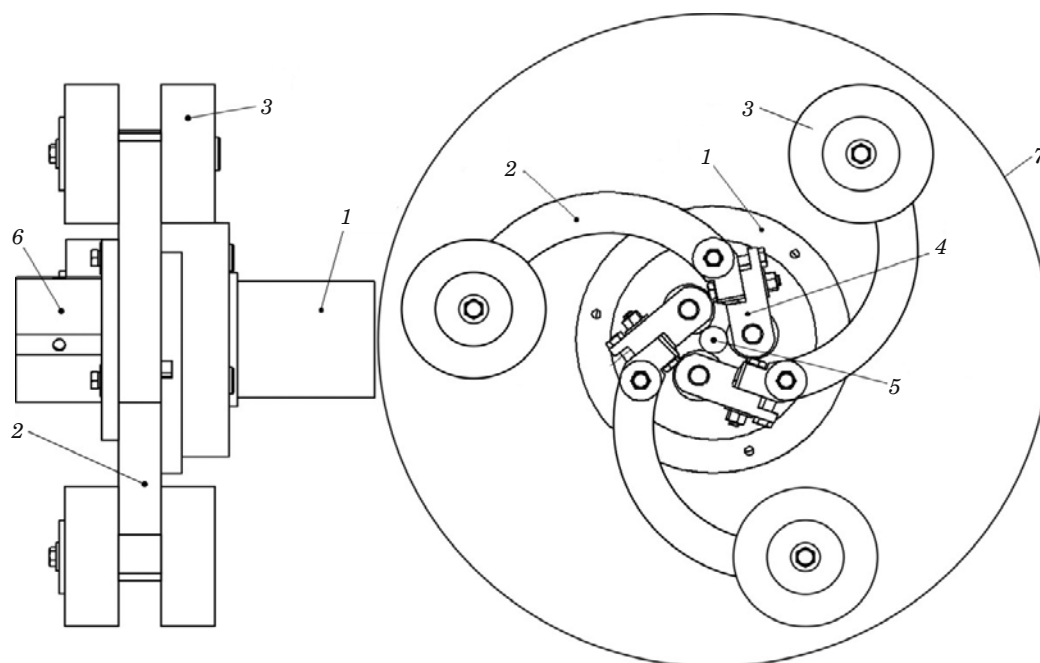


Рис. 1. Конструкция центробежного обкатника: 1 — корпус и лекало; 2 — криволинейный рычаг; 3 — груз; 4 — державка с деформирующим роликом; 5 — обкатываемая деталь; 6 — дополнительная опора; 7 — защитный кожух

рычага, который уравнивается моментом рабочего усилия относительно той же точки. Рабочее усилие регулируется соотношением плеч и величиной груза. При большой величине груза достаточные для обработки ППД усилия возникают при частоте вращения, обеспечиваемой стандартным оборудованием.

Зона свободного влияния. Проблема повышения стабильности геометрических размеров и формы деталей после различных технологических воздействий связана с повышением сопротивления микропластическим деформациям [16 – 18] и уменьшением внутренних остаточных напряжений. Полностью исключить остаточные напряжения невозможно. При неравномерности обработки формирующиеся в процессе изготовления и ППД остаточные напряжения приводят к изменению геометрических размеров и формы маложесткой детали.

При упрочняющей обработке маложестких валов принимают компромиссное решение. При имеющемся уровне остаточных напряжений повышают величину напряжения, при котором в структуре начинаются микропластические деформации, активирующие релаксационные и другие процессы [16].

Влияние свободной поверхности на совместную деформацию затухает на некотором расстоянии, которое пропорционально количеству зерен. Это утверждение многократно проверялось на различных конструкционных материалах (однофазных, многофазных, разной величины прочности) [19 – 21].

При изучении закономерностей деформации нежестких деталей, изготовленных из поликристаллических многофазных материалов, рассматривают особенности взаимодействия зерен и фаз в приповерхностном объеме, отказавшись от весьма упрощенной модели изотропного однородного континуума. Влияние свободной поверхности и зерен друг на друга распространяется на некоторое расстояние, которое можно назвать зоной взаимного влияния. Данная зона — это часть поликристаллического тела, прилегающая к свободной поверхности, в пределах которой на взаимосвязанную деформацию зерен оказывает влияние свободная поверхность. Слой, прилегающий к свободной поверхности тела, толщина которого равна размеру зоны взаимного влияния, называется поверхностным слоем (ПС).

Экспериментальные исследования, проведенные на различных углеродистых сплавах, позволили установить закономерности изменения толщины зоны взаимного влияния [22]. С увеличением размера зерна количество зерен, вовлеченных в совместную деформацию, уменьшается при одновременном увеличении расстояния, на котором оно проявляется. В мелкозернистых материалах ($d_z = 1 - 5$ мкм) размер зоны не превышает 25 – 90 мкм. Экспериментальные данные хорошо описывает кривая [23]

$$n_z = 25,715d_z^{-0,208}, \quad (1)$$

где n_z — число зерен в пределах зоны взаимного влияния; d_z — размер зерна, мкм.

Главная особенность объема, прилегающего к свободной поверхности, — неоднородность напряжения течения по толщине слоя. Многочисленные исследования [24 – 28] показали течение приповерхностного объема различных конструкционных материалов при напряжениях, много меньших предела текучести всего образца.

Следовательно, конструкция обкатника должна исключить возможность возникновения изгибных деформаций или ограничить их такой величиной изгибающего момента, при котором пластическое течение не распространяется за пределы зоны взаимного влияния. Это возможно только при полном силовом замыкании рабочего усилия или уменьшении расстояния между опорами до величины, гарантирующей распространение микропластической деформации не более чем глубина зоны взаимного влияния, и ограничении предельного деформирующего усилия исходя из тех же условий.

Толщина слоя (зоны взаимного влияния) r_f зависит от размера зерна d_3 микроструктуры [20, 21, 24]:

$$r_f = n_3 d_3,$$

где n — число зерен. После подстановки в эту зависимость эмпирического уравнения (1) получим

$$r_f = 25,715 d_3^{0,792}. \quad (2)$$

Обычно размер зерна в валах изменяется от 20 до 200 мкм. Поверхностный слой занимает от 5 до 75 % площади поперечного сечения. Неоднородность механических свойств по поперечному сечению детали имеет место еще до ППД. Чтобы ее уменьшить, необходимо увеличить напряжение в поверхностном слое и уменьшить размер зерна в пределах толщины поверхностного слоя. Сделать это можно различными методами, в том числе ППД. Упрочнение маложестких валов, очевидно, не должно распространяться на глубину, большую, чем толщина поверхностного слоя.

Расчетная глубина упрочненного слоя. Глубина упрочнения при ППД связана с основными параметрами, определяющими качество обработки: степенью деформационного упрочнения, величиной и глубиной залегания остаточных напряжений сжатия, шероховатостью и волнистостью обработанной поверхности [29, 30].

Если в качестве деформирующего тела используют ролик, то пятно контакта представляет собой эллипс. В этом случае пластическое течение начинается на границе пятна контакта большой оси эллипса и развивается как в сторону внеконтактной зоны, так и по периметру к концам малой оси [8]. Рассматривая равновесие гид-

ростатического ядра пластического отпечатка и деформирующего ролика, глубину распространения пластической деформации можно определить по аналитической зависимости, позволяющей рассчитать глубину упрочнения h_t в пределах зоны взаимного влияния:

$$h_t = \frac{1}{k} \left[\sqrt{\frac{(15P_3 + 65)n^2 \cdot 10^{-5}}{\pi \alpha_1 \sigma_n} + \frac{1}{4}(a-b)^2} - \frac{1}{4}(a+b) \right] + t, \quad (3)$$

где P_3 — вес груза; n — частота вращения обкатника; a, b — полуоси эллипса пятна контакта ролика с деталью; t — глубина невозстановленной лунки; σ_n — нормальное напряжение в очаге деформации; k — коэффициент, характеризующий глубину распространения пластической деформации от давления ролика; α_1 — коэффициент, учитывающий изменение площади пятна контакта при вращении инструмента. Значения коэффициентов, входящих в формулы (3), определяют экспериментально. Размеры полуосей a, b контура пятна контакта и глубину лунки t можно рассчитать по методике, изложенной в работе [31].

Принимая за предельную величину глубины упрочнения размер зоны взаимного влияния, можно рассчитать максимальную частоту вращения и интервал, в пределах которого необходимо искать рациональную частоту вращения центробежного обкатника. Для этого в формулу (3) подставим глубину упрочнения, равную размеру зоны взаимного влияния (2). После преобразования получим

$$n = 100 \sqrt{\frac{10\pi k_\sigma \alpha_1 \sigma_{кр}}{15P_3 + 65}} \times \sqrt{kk_d d^{0,792} - t + \frac{a+b}{4} - \frac{(a-b)^2}{4}}, \quad (4)$$

где d_3 — диаметр зерна, мкм; P_3 — вес груза, Н; $\sigma_{кр}$ — критическое напряжение, Н/мм²; $k_d = 0,0257$; $k_\sigma = 2,5 - 2,6$; $k = 1 - 10$; $\alpha_1 = 1,4 - 1,6$; a, b — размеры полуосей эллипса пятна контакта.

Формула (4) позволяет определить необходимую частоту вращения обкатника, которая обеспечит формирование глубины упрочненного слоя в пределах зоны взаимного влияния.

Методика экспериментального определения глубины упрочнения. При поверхностной пластической деформации нежестких валов глубина упрочнения должна быть в пределах величины

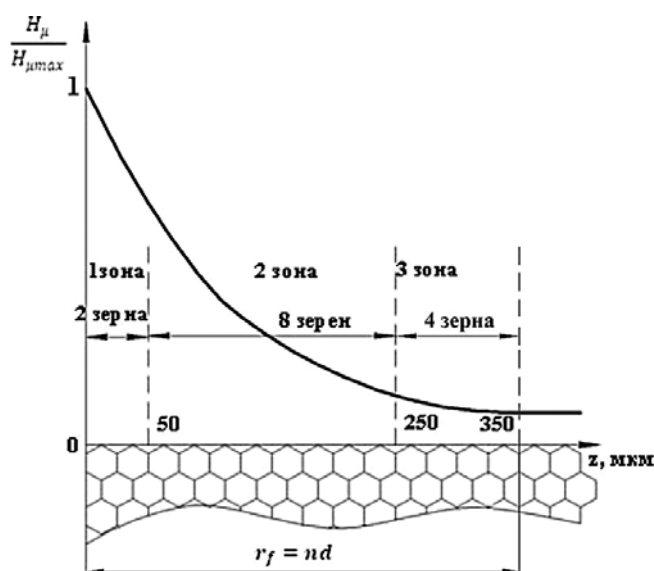


Рис. 2. Распределение относительной твердости по толщине поверхностного слоя

зоны взаимного влияния. При этом важно обеспечить равномерность упрочнения (одинаковость глубины) по периметру в поперечном сечении и вдоль оси вала. Необходимо стремиться к тому, чтобы минимальная величина интенсивности деформаций на цилиндрической поверхности радиуса была равномерной. Это условие должно быть обеспечено с учетом точности замера среднего размера зерна и точности экспериментального метода определения глубины деформационного упрочнения.

Область, подвергающаяся силовому воздействию разного уровня, может быть разделена на три зоны (рис. 2). Первая зона, непосредственно прилегающая к обработанной поверхности и наиболее деформированная, характеризуется повышенной твердостью, наибольшими искажениями кристаллической решетки разного структурного уровня. Эта зона располагается на глубине, составляющей 10 – 15 % от общей глубины наклепа.

Вторая зона отличается меньшими раздроблением зерен и искажениями кристаллической решетки. Глубина второй зоны — 50 – 70 % от общей глубины наклепа. В третьей зоне деформации затухают. Здесь располагаются такие деформированные слои, которые по своей твердости незначительно отличаются от твердости основы.

Анализ экспериментальных данных показывает, что увеличение глубины упрочнения при неизменной величине удельного давления приводит к уменьшению интенсивности деформации во второй и особенно в третьей зонах деформационного упрочнения.

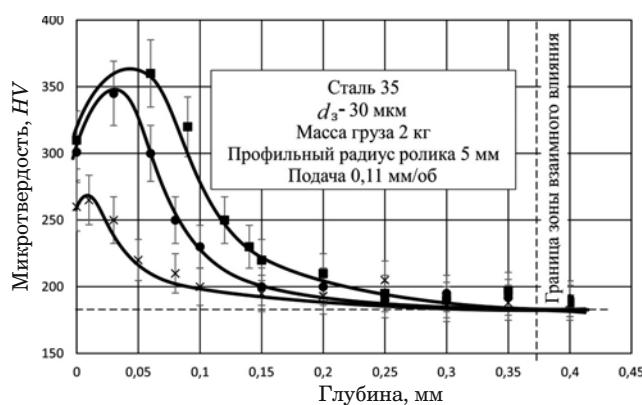


Рис. 3. Зависимость микротвердости от глубины упрочненного слоя; частота вращения обкатника равна 315 (●), 400 (■), 200 об/мин (×)

Для определения глубины упрочнения выбрали электромагнитный способ, фиксирующий начало микропластического течения в поверхностном слое [32]. Полученные данные контролировали широко распространенным способом замера микротвердости. Перед экспериментом определяли размер зерна микроструктуры и рассчитывали по формуле (2) размер зоны взаимного влияния r_f . Поверхности участков одного и того же образца длиной 60 – 70 мм упрочняли центробежным обкатником при различных технологических параметрах (вес груза, скорость вращения обкатника, величина подачи и др.). Обкатанный образец нагружали испытательной машиной Р-50. Напряжение начала течения поверхностного слоя на каждом из участков определяли по методике, изложенной в [22], а после разгрузки — микротвердость твердомером ПМТ-3. Изучение микротвердости по глубине поверхностного слоя показало (рис. 3), что при частоте вращения меньше 200 об/мин максимум твердости лежит на или вблизи свободной поверхности. При дальнейшем увеличении частоты вращения максимум твердости смещается вглубь.

За глубину упрочнения принимали границу, на которой напряжение течения поверхностного слоя и микротвердость отличались от результатов последующих замеров по глубине на величину интервала разброса экспериментальных данных.

Экспериментальное определение рациональной глубины упрочнения. Любые технологические воздействия в целях уменьшения остаточных напряжений должны быть направлены на выравнивание механических свойств в пределах зоны взаимного влияния. Таким образом, предельная физически обоснованная глубина упрочнения ППД нежестких деталей не может существенно превышать размер зоны взаимного влияния.

Эффективность воздействий на приповерхностный объем детали поверхностным пластическим деформированием при минимальной величине остаточных напряжений ограничена условием достижения минимально возможной шероховатости. В то же время минимальная глубина упрочнения не может быть меньше размера зерна, а максимальная — больше размеров зоны взаимного влияния. Чем меньше размер зерна, тем меньше размер зоны взаимного влияния и тем большее количество зерен в пределах этой зоны [20, 21].

Существование критической величины деформации поверхностного слоя и соответствующего ей критического напряжения, после которого поверхностный слой практически не упрочняется или разупрочняется, ограничивает интенсивность деформации. Существенное превышение ее приводит к шелушению поверхности и снижению качественных показателей ППД.

Очевидно, при заданных шероховатости и размере зерна микроструктуры для валов малой жесткости существует минимальная глубина упрочнения в пределах зоны взаимного влияния, обеспечивающая достаточно низкую шероховатость и высокую несущую способность.

Для проверки этой гипотезы были проведены экспериментальные исследования на образцах из стали 35 в нормализованном состоянии, имеющих длину 300 мм, диаметр 16 мм и шероховатость R_a , равную 1,25; 2,5 и 5,0 мкм. Средний размер зерна ферритно-перлитной структуры в поверхностном слое во всех образцах составлял около 30 мкм.

Глубина упрочнения поверхностного слоя при центробежном обкатывании монотонно возрастает с увеличением числа оборотов (рис. 4, кривая 1). В исследованном диапазоне R_a (5,00 – 1,25 мкм) минимальная шероховатость поверхности заготовок из стали 35 с размером зерна 30 мкм наблюдалась при частоте вращения 315 об/мин, которой соответствует глубина упрочнения около 400 мкм. Эта величина близка к толщине ослабленного поверхностного слоя (размеру зоны взаимного влияния).

Размер шероховатости существенно не изменяется по сравнению с минимальной при уменьшении глубины упрочнения почти в два раза (см. рис. 4). Этот экспериментальный факт позволяет утверждать, что рациональные технологические параметры обработки ППД нежестких деталей следует искать вблизи границы зоны взаимного влияния.

При всех исследованных значениях исходной шероховатости рациональная частота вращения оказалась в пределах 280 – 320 об/мин (см. рис. 4), что соответствует величине усилия при-

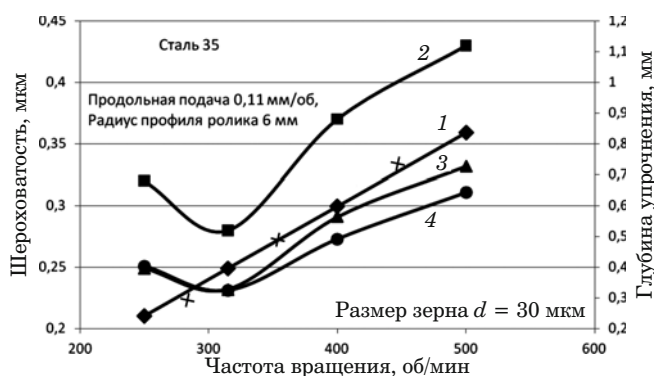


Рис. 4. Зависимость глубины упрочнения (1) и шероховатости поверхности вала (2, 3, 4) от частоты вращения центробежного обкатника: ■, ▲, ● — исходная шероховатость R_a равна 5,0; 1,25; 2,5 мкм соответственно; × — глубина упрочнения, определенная экспериментально

жима ролика около 380 – 420 Н. Шероховатость поверхности, соответствующая рациональной частоте вращения центробежного обкатника, зависит от исходной шероховатости. Чем выше исходная шероховатость, тем больше шероховатость, соответствующая рациональным параметрам технологического процесса.

Глубина упрочнения поверхностного слоя монотонно возрастает при увеличении числа оборотов. Обнаружена взаимосвязь минимальной шероховатости с величиной зоны взаимного влияния. Для стали 35 при глубине упрочнения, равной 330 – 520 мкм (рис. 4, кривая 1), получаемая после центробежного обкатывания шероховатость уменьшается несколько раз.

Как видно из рис. 3, указанная глубина упрочнения близка к толщине ослабленного поверхностного слоя (размеру зоны взаимного влияния). Дальнейшая деформация шероховатостей с частотой более 320 об/мин приводит к распространению пластической деформации на глубину, большую, чем размер зоны взаимного влияния. При этом приповерхностный слой зерен деформируется до критической деформации, после которой он более не упрочняется.

При частоте вращения обкатника около 460 – 550 об/мин и подаче 0,11 мм/об наблюдали шелушение поверхностного слоя, что свидетельствует о критической деформации поверхностного слоя зерен и перенаклепе объема, залегающего на глубине более, чем размер зоны взаимного влияния.

Размер шероховатости существенно не изменяется по сравнению с минимальной при уменьшении глубины упрочнения почти в два раза (см. рис. 4). Это, как известно, существенно снижает остаточные напряжения, возникающие от ППД. Для стали 35 упрочнение на глубину 200 мкм достаточно для полной проработки неоднородностей пластической деформации и значительно

снизит их влияние на качество обработки маложестких валов центробежным обкатником.

Таким образом, рациональные технологические параметры отделочной обработки нежестких деталей следует искать вблизи границы зоны взаимного влияния, которая находится на глубине определяемой формулой (2). При заданной глубине упрочнения, выбранном весе по формуле (4) может быть рассчитана рациональная частота вращения обкатника. Достоверность результатов, получаемых по формуле (4), проверена экспериментально на образцах из стали 35. Теоретическая кривая 1 на рис. 4 удовлетворительно совпадает с экспериментально определенными глубинами упрочнения при различной частоте вращения обкатника.

Таким образом, установлено, что качество обработки нежестких валов центробежным обкатником зависит от свойств и толщины зоны взаимного влияния, которая определяется средним размером зерна микроструктуры. Разработана новая конструкция центробежного обкатника, обеспечивающая неизменность рабочего усилия, стабильность деформации и напряжений по длине упрочняемой заготовки. Установлена теоретически и экспериментально подтверждена рациональная глубина упрочнения поверхностного слоя нежестких валов при отделочно-упрочняющей обработке ППД. Она не должна быть больше размера зоны взаимного влияния.

ЛИТЕРАТУРА

1. Папшев Д. Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. — М.: Машиностроение, 1978. — 152 с.
2. Емельянов В. Н. Правка деталей машин поверхностным пластическим деформированием. — Новгород: НовГУ, 1996. — 127 с.
3. Зайдес С. А., Мураткин Г. В. Упрочнение, восстановление, правка валов. — Иркутск: ИрГТУ, 2005. — 336 с.
4. Шнейдер Ю. Г. Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства. — Л.: Машиностроение, 1972. — 240 с.
5. Зайдес С. А., Нгуен Ван Хуан. Влияние остаточных напряжений на изгибную жесткость длинномерных валов / Вестник ИрГТУ. 2015. № 9. С. 45 – 49.
6. Технологические остаточные напряжения / Под ред. А. В. Подзая. — М.: Машиностроение, 1973. — 216 с.
7. Сулима А. М., Шулов В. А., Ягодкин Ю. Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. — М.: Машиностроение, 1988. — 240 с.
8. Смелянский В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. — М.: Машиностроение, 2002. — 299 с.
9. Дрозд М. С., Сидякин Ю. И. Метод оптимизации технологических параметров режима упрочняющего обкатывания деталей роликами / Вестник машиностроения. 1984. № 1. С. 26 – 28.
10. Коновалов Е. Г., Сидоренко В. А. Чистовая и упрочняющая ротационная обработка поверхностей. — Минск: Вышэйшая школа, 1968. — 363 с.
11. Коновалов Е. Г., Чистосердов П. С., Флюмблит А. И. Ротационная обработка поверхностей с автоматической подачей. — Минск: Вышэйшая школа, 1976. — 190 с.
12. Дрозд М. С. Определение механических свойств металла без разрушения. — М.: Металлургия, 1985. — 171 с.
13. Дрозд М. С., Сидякин Ю. И., Осипенко А. П., Волынов А. Н. Расчет глубины пластической деформации при упрочнении деталей ППД / Вестник машиностроения. 1979. № 1. С. 19 – 23.
14. Ефремова Е. А., Журавлев А. З. Глубина упрочненного слоя при поверхностной пластической деформации (обзор) / Прогрессивная отделочно-упрочняющая технология. — Ростов-н/Д.: РИСХМ, 1980. С. 48 – 56.
15. Пат. 2124431 Российская Федерация, МКИЗ кл. 6В 24 В 39/4. Станок для отделочно-упрочняющей обработки цилиндрических изделий / Зайдес С. А. — № 97105098/02; заявл. 21.03.97; опубл. 10.01.99. Бюл. № 1.
16. Балтер М. А. Упрочнение деталей машин. — М.: Машиностроение, 1978. — 184 с.
17. Федюкин В. К., Смагоринский М. Е. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин. — М.: Машиностроение, 1989. — 255 с.
18. Хенкин М. Л., Локшин И. Х. Размерная стабильность металлов и сплавов в точном машиностроении и приборостроении. — М.: Машиностроение, 1974. — 254 с.
19. Жуков В. А., Виноградова Н. В., Маринец Т. К. Масштабный фактор и структура металлов / Тр. ЛПИ. 1981. С. 57 – 61.
20. Hiroshi F. Effect of boundaries on plastic deformation / J. Mater. Sci. Jap. 1980. Vol. 17. N 5. P. 196 – 205.
21. Miyazaki S., Shibata K., Fujita H. Effect of specimen thickness on mechanical properties of polycrystalline aggregates with various grain sizes / Acta Metallurgica. 1979. Vol. 27. N 5. P. 855 – 862.
22. Зайдес С. А., Горбунов А. В. Определение механических свойств поверхностного слоя маложестких валов, упрочненных поверхностным пластическим деформированием / Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 3. С. 15 – 19.
23. Зайдес С. А., Горбунов А. В. Повышение качества валов малой жесткости центробежным обкатыванием / Вестник машиностроения. 2015. № 12. С. 72 – 77.
24. Norstrem L. A., Iachasson D. Surface yield strength and flow stress in high-strength martensitic steel / Scfnd. J. Mat. 1983. Vol. 12. N 1. P. 37 – 39.
25. Алексин В. П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. — М.: Наука, 1983. — 280 с.
26. Балохонов Р., Болеста А., Бондарь М. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. — 520 с.
27. Жуков В. А., Виноградова Н. В., Маринец Т. К. Масштабный фактор и структура металлов / Тр. ЛПИ. 1981. С. 57 – 61.
28. Панин В., Гриняев Ю. Физическая мезомеханика — новая парадигма на стыке физики и механики деформируемого твердого тела / Физ. мезомех. 2003. Т. 6. № 4. С. 9 – 36.
29. Пшибыльский В. Технология поверхностной пластической обработки: Пер. с польск. — М.: Металлургия, 1991. — 79 с.
30. Суслов А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. — М.: Машиностроение, 2000. — 318 с.
31. Дрозд М. С., Матлин М. М., Сидякин Ю. И. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации. — М.: Машиностроение, 1986. — 224 с.
32. Зайдес С. А., Горбунов А. В. Научно-обоснованное определение оптимальных параметров качества поверхностного слоя маложестких валов при центробежном обкатывании / Научомки технологии в машиностроении. 2016. № 6. С. 28 – 34.

REFERENCES

1. Papshev D. D. Finishing-strengthening processing with superficial plastic deformation. — Moscow: Mashinostroyeniye, 1978. — 152 p. [in Russian].

2. **Emel'yanov V. N.** Dressing of machines parts by surface plastic deformation. — Novgorod: NovGU, 1996. — 127 p. [in Russian].
3. **Zaides S. A., Muratkin G. V.** Hardening, restoration, correction of shafts. — Irkutsk: IrGTU, 2005. — 336 p. [in Russian].
4. **Shneider Yu. G.** Formation of regular micro relief on the parts and their exploitation properties. — Leningrad: Mashinostroenie, 1972. — 240 p. [in Russian].
5. **Zaides S. A., Nguen Van Khuan.** Residual stress on long-length shaft bending stiffness / Vestn. IrGTU. 2015. N 9. P 45 – 49 [in Russian].
6. Technological residual stresses / Podzei A. V. (ed.). — Moscow: Mashinostroenie, 1973. — 216 p. [in Russian].
7. **Sulima A. M., Shulov V. A., Yagodkin Yu. D.** Surface layer and exploitation properties of machines parts. — Moscow: Mashinostroenie, 1988. — 240 p. [in Russian].
8. **Smelyanskii V. M.** Mechanics of parts hardening by surface plastic deformation. — Moscow: Mashinostroenie, 2002. — 299 p. [in Russian].
9. **Drozd M. S., Sidiyakin Yu. I.** Optimization method of process parameters of a hardening rolling mode of parts by rollers / Vestn. Mashinost. 1984. N 1. P 26 – 28 [in Russian].
10. **Konovalov E. G., Sidorenko V. A.** Pure and hardening rotary surface treatment. — Minsk: Vyshéishaya shkola, 1968. — 363 p. [in Russian].
11. **Konovalov E. G., Chistoserdov P. S., Flyumbenblit A. I.** Rotary surface treatment with automatic feed. — Minsk: Vyshéishaya shkola, 1976. — 190 p. [in Russian].
12. **Drozd M. S.** Determination of mechanical properties of a metal without destruction. — Moscow: Metallurgiya, 1985. — 171 p. [in Russian].
13. **Drozd M. S., Sidiyakin Yu. I., Osipenko A. P., Volyanov A. N.** The calculation of plastic deformation depth during parts hardening by SPD / Vestn. Mashinost. 1979. N 1. P 19 – 23 [in Russian].
14. **Efremova E. A., Zhuravlev A. Z.** The depth of a hardening layer after surface plastic deformation (review) / Progressive finishing-strengthening technology. — Rostov-on-Don: RISKHM, 1980. P 48 – 56 [in Russian].
15. RF Pat. 2124431, MKI3 kl. 6V 24 V 39/4. Machine for finishing and hardening of cylindrical products / Zaides S. A. — N 97105098/02; appl. 21.03.97; publ. 10.01.99. Byull. N 1 [in Russian].
16. **Balter M. A.** Hardening of machines parts. — Moscow: Mashinostroenie, 1978. — 184 p. [in Russian].
17. **Fedyukin V. K., Smagorinskii M. E.** Thermocycle treatment of metals and machine parts. — Moscow: Mashinostroenie, 1989. — 255 p. [in Russian].
18. **Khenkin M. L., Lokshin I. Kh.** Dimensional stability of metals and alloys in the precision engineering and instrument. — Moscow: Mashinostroenie, 1974. — 254 p. [in Russian].
19. **Zhukov V. A., Vinogradova N. V., Marinets T. K.** Scale factor and metal structure / Tr. LPI. 1981. P 57 – 61 [in Russian].
20. **Hiroshi F.** Effect of boundaries on plastic deformation / J. Mater. Sci. Jap. 1980. Vol. 17. N 5. P 196 – 205.
21. **Miyazaki S., Shibata K., Fujita H.** Effect of specimen thickness on mechanical properties of polycrystalline aggregates with various grain sizes / Acta Metallurgica. 1979. Vol. 27. N 5. P 855 – 862.
22. **Zaides S. A., Gorbunov A. V.** Determining of the surface layer mechanical properties of the non-rigid shafts hardening by surface plastic deformation / Uprochn. Tekhnol. Pokryt. 2015. N 3. P 15 – 19 [in Russian].
23. **Zaides S. A., Gorbunov A. V.** Increase of quality of low-stiff shafts by centrifugal rolling / Vestn. Mashinost. 2015. N 12. P 72 – 77 [in Russian].
24. **Norstrom L. A., Iachasson D.** Surface yield strength and flow stress in high-strength martensitic steel / Scfnd. J. Mat. 1983. Vol. 12. N 1. P 37 – 39.
25. **Alekhin V. P.** Physics of strength and ductility of surface layer materials. — Moscow: Nauka, 1983. — 280 p. [in Russian].
26. **Balokhonov R., Bolesta A., Bondar' M.** The surface layers and internal interfaces in heterogeneous materials. — Novosibirsk: Izd. SO RAN, 2006. — 520 p. [in Russian].
27. **Zhukov V. A., Vinogradova N. V., Marinets T. K.** Scale factor and metal structure / Tr. LPI. 1981. P 57 – 61 [in Russian].
28. **Panin V., Grinyaev Yu.** Physical mesomechanics: a new paradigm at the interface of solid state physics and solid mechanic / Fiz. Mezomekh. 2003. Vol. 6. N 4. P 9 – 36 [in Russian].
29. **Pshibyl'skii V.** Technology of surface plastic treatment. — Moscow: Metallurgiya, 1991. — 79 p. [Russian translation].
30. **Suslov A. G.** The quality of machines parts surface layer. — Moscow: Mashinostroenie, 2000. — 318 p. [in Russian].
31. **Drozd M. S., Matlin M. M., Sidiyakin Yu. I.** Engineering calculation of elasto-plastic contact deformation. — Moscow: Mashinostroenie, 1986. — 224 p. [in Russian].
32. **Zaides S. A., Gorbunov A. V.** Science-based determination of optimal quality parameters of non-rigid shafts' surface layer after centrifugal rolling / Naukoem. Tekhnol. Mashinost. 2016. N 6. P 28 – 34 [in Russian].