

УДК 621.81

UDS 621.81

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ УСЛОВИЙ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ МЕТОДОМ ТОЧЕЧНЫХ МЕССДОЗ

RESEARCH OF CONTACT CONDITIONS AT SUPERFICIAL PLASTIC DEFORMATION BY A METHOD DOT MESSDOZ.

Горохова Марина Николаевна
к.т.н., доцент

Gorokhova Marina Nikolayevna
Cand.Tech.Sci., associate professor

Бышов Николай Владимирович
д.т.н., профессор

Byshov Nikolay Vladimirovich
Dr.Sci.Tech., professor

Угланов Михаил Борисович
д.т.н. профессор

Uglanov Mikhail Borisovich
Dr.Sci.Tech., professor

Бачурин Алексей Николаевич
к.т.н. доцент

Bachurin Alexey Nikolayevich
Cand.Tech.Sci., associate professor

Абрамов Юрий Николаевич
ст.преподаватель

Abramov Yuri Nikolayevich
senior lecturer

Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, Рязань, Россия

Ryazan State Agrotechnological University of P.A. Kostychev, Ryazan, Russia

В статье исследованы контактные условия при поверхностном пластическом деформировании обкатывающими роликами деталей методом точечных мессдоз

In this article, contact conditions are investigated at superficial plastic deformation by running-in rollers of details by a method of load cells

Ключевые слова: ПОВЕРХНОСТНОЕ ПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ, РОЛИКИ, ТОЧЕЧНАЯ МЕССДОЗА, КОНТАКТНЫЕ УСЛОВИЯ

Keywords: SUPERFICIAL PLASTIC DEFORMATION, ROLLERS, LOAD CELLS, CONTACT CONDITIONS

В настоящее время в области металлообработки определилось актуальное направление, связанное со снижением припусков и расширением объема финишных операций, в процессе которых окончательно формируются качественные металлопокрытия с заданными геометрическими размерами. Актуальность отделочных технологических операций также в значительной степени определяется и себестоимость обрабатываемых деталей.

Наукой доказано, что отделочные технологические процессы методами поверхностного пластического деформирования (ППД) заменяют традиционные процессы резания, и обеспечивают более высокие качественные показатели обработанной детали, а также экономию материаль-

ных средств, что происходит за счет увеличения эксплуатационных сроков службы деталей, замены высоколегированных сталей менее легированными, а также снижения затрат труда. Обкатывание роликами экономичнее отделочных процессов абразивной обработки в 4-4,5 раза. В результате обработки методами ППД в 1,5-2 раза повышается несущая способность деталей по допускаемым напряжениям и значительно повышается их долговечность. Обработка деталей машин методами ППД увеличивает площадь контакта сопрягаемых деталей (до 90 %), что способствует более ранней их приработке в подвижных соединениях и большей прочности неподвижных посадок, повышает предел коррозионной выносливости в 2-2,5 раза в химических средах, уменьшает влияние на прочность деталей концентрации напряжений в местах отверстий, галтелей, выточек. При обработке методами ППД в деталях возникают благоприятные остаточные сжимающие напряжения, при этом шероховатость поверхности снижается с $R_a=3,2-0,8$ до $R_a=0,8-0,025$ мкм [1].

Данная статья посвящена исследованию процесса поверхностного пластического деформирования методом обкатывания роликами. Сущность исследования контактных условий при ППД методом точечных мессдоз заключается в том, что часть усилия воспринимается штифтом и фиксируется прибором. Данный метод имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами и позволяет учитывать упрочнение тонкого поверхностного слоя детали, дает возможность измерять нормальные напряжения и силы трения, как при упругой, так и при пластической деформации, а также определять длину дуги контакта между деформирующим элементом и обрабатываемой деталью [1].

Для экспериментального определения удельных нормальных давлений и контактных сил трения на площадке контакта между роликами и обкатываемой поверхностью используется специальное приспособление, которое для обкатки образца 4 устанавливается на поперечных салазках то-

карно-винторезного станка модели 1К62 [2]. В направляющих основания 9 устанавливается динамометр 8, который служит для определения радиальных и тангенциальных составляющих усилия при обкатывании роликом (рис.1). Обкатывающий ролик 6 устанавливается в динамометре и может поворачиваться вокруг своей оси в вертикальной, а также в горизонтальной плоскостях. Верхняя плита динамометра устанавливается на четыре колонки. Усилие, необходимое для обкатывания, создается винтом 5. Уравновешивающий ролик 2 смонтирован в левой скобе 3, связанной винтом со скобой 7 и при помощи задней стойки 1 устанавливается по центру прокладок 10. Обкатывающий ролик диаметром 148,5 мм имеет сменные вкладыши, которые хомутами 12 к нему крепятся. В сменных вкладышах установлены точечные мессдозы. Тонкостенные цилиндры 14 закреплены во вкладышах контргайками 16. Измерительные штифты 15 изготовлены из стали ШХ15, закалены и отпущены до HRC 59-61. Тензодатчики 13 сопротивлением 97 Ом с базой 5 мм наклеены на цилиндры вдоль и поперек образующих. Соединение тензодатчиков производится по схеме полумоста Уитсона. При этом вторая половина моста встроена в усилительное устройство. Обкатывающий ролик изготовлен из стали 40Х и закален до HRC 54. При изготовлении вкладышей, во избежание их сдвига во время обкатывания, особое внимание уделено подгонке опорных плоскостей и притирке отверстий под измерительные штифты для получения оптимального зазора между штифтом мессдозы и каналом вкладыша.

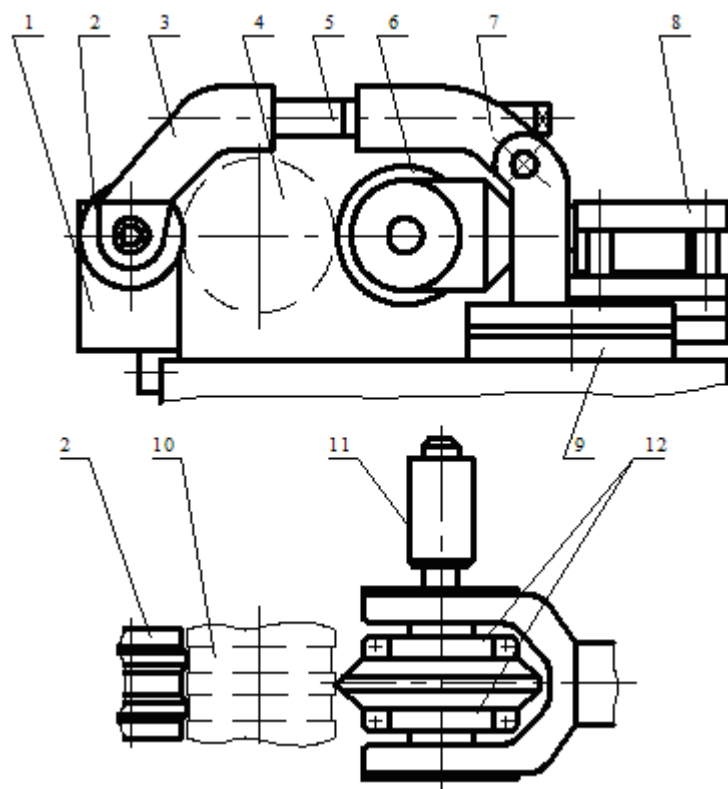


Рисунок 1. - Экспериментальное обкатное приспособление

Полировка отверстий под измерительные штифты проводилась латунными притирами и пастой ГОИ, а полировка штифтов - пастой ГОИ.

Закрепленные вкладыши с установленными точечными мессдозами шлифовались в сборе с роликом. Во вкладышах для измерения удельных нормальных давлений и контактных сил трения в диаметральной плоскости ролика установлены по две точечные мессдозы: одна - радиальная, другая - наклонная с углом наклона 30° относительно радиальной в радиально-окружной плоскости ролика.

С целью исследования контактных сил трения вдоль оси обкатываемой детали изготовлены вкладыши с установленными наклонными мессдозами под углом 30° относительно радиальной мессдозы в горизонтальной плоскости. Для передачи сигналов от мессдоз к аппаратуре используется ртутный амальгамированный 8-канальный токосъемник типа РАТ-2-11, который вносит наименьшие погрешности в передаваемый сигнал (не

Плотная подгонка штифта способствует заклиниванию его в отверстии во время обкатывания, а в большой зазор затекает металл, что также сказывается на показаниях мессдоз [3]. Как показали экспериментальные исследования, оптимальные условия работы штифтов обеспечиваются при зазорах между измерительным штифтом и каналами вкладышей 0,015-0,02 мм.

более 1 %). Провода от датчиков проходят через отверстие в валу ролика и припаиваются к соответствующим выводам токосъемника. На валу ролика установлен кулачок, который включает и выключает кассету осциллографа в период прохождения точечными месдозами дуги контакта.

Известная скорость движения пленки в осциллографе и расстояние между измерительными штифтами радиальной и наклонной точечной месдозы (38,8 мм), позволяет определить длину дуги контакта между роликом и обкатываемой деталью. Так как во вкладышах смонтировано по две точечные месдозы (рис. 1, направление I и II), то с целью проверки полученных результатов обкатывание производили в прямом и обратном направлениях. Обработку осциллограмм производили как по двум наклонным, так и по наклонной и радиальной месдозам. Полученные результаты оказались одинаковыми, что говорит о стабильной и надежной работе оснастки и аппаратуры. Обкатной ролик имеет цилиндрическую ленту длиной 10 мм, заборный и обратный конусы по 30°.

С целью исследования распределения нормальных удельных давлений и контактных сил трения вдоль площадки контакта изготовлено четыре вкладыша с месдозами, расположенными на различном расстоянии друг от друга вдоль цилиндрической ленточки. При проведении экспериментальных исследований использовалась тензометрическая аппаратура, в комплект которой входит осциллограф и тензометрический усилитель (рис. 2). Осциллограммы записываются на пленку чувствительностью больше 350 единиц. Скорость движения пленки в осциллографе выбирается в зависимости от скорости обкатывания и составляет 250-1000 мм/мин.

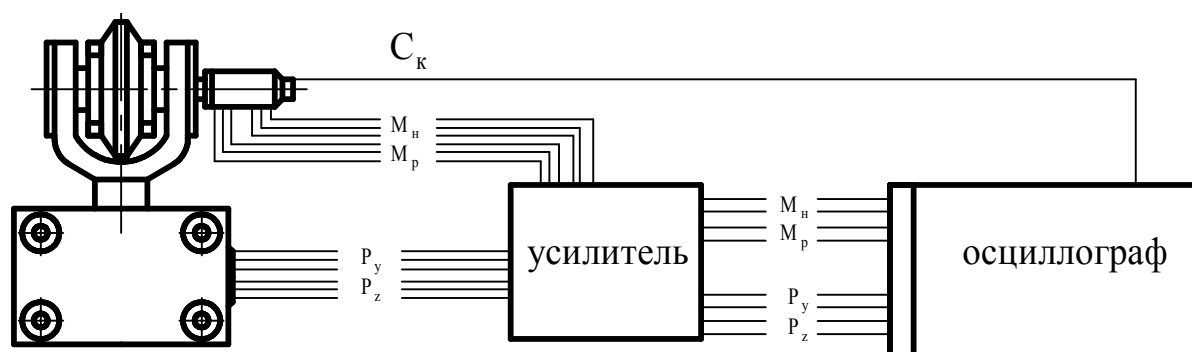


Рисунок 2. – Блок-схема экспериментального обкатного приспособление

Обкатывались образцы диаметром от 50 до 100 мм, толщиной 7-15 мм, изготовленные из стали Ст 5, 45, У8 и армо-железа. Изготовление вкладышей, штифтов мессдоз, а также расшифровку полученных осциллограмм удельных нормальных давлений производили с учетом следующих недостатков, присущих данному методу [4]:

1. Так как измерительный штифт мессдозы имеет определенный диаметр, то измеряемые удельные давления получаются усредненными по площадке среза штифта.

2. В процессе проведения экспериментов наблюдается некоторое защемление штифтов в каналах ввиду упругой деформации инструмента, что оказывает влияние на показания датчиков.

3. Происходит затекание металла в штифтовое отверстие, которое вносит изменения в напряженно-деформационное состояние в области, примыкающей к торцовой поверхности штифта, и искажает показания мессдоз.

Влияние первого недостатка оказывает влияние в начальный и конечный периоды обкатки образца, когда штифт соприкасается с поверхностью детали частью торцовой площади. На среднем участке осциллограммы - отклонение величины среднего по площадке контакта давления от истинного является минимальным ввиду незначительного приращения удельного давления по дуге контакта. С целью устранения этого

недостатка использовался метод обработки концов осциллограмм, который заключался в установлении по опытным кривым истинной кривой распределения удельного давления по дуге контакта. Влияние упругой деформации инструмента снижается подбором оптимального зазора между измерительным штифтом и отверстием вкладыша [5].

Градуировку точечных мессдоз производили в специальном штампе (рис. 3), что позволило, учитывая затекание металла в штифтовой канал, с помощью градуировочных графиков независимо от жесткости мессдоз и инструмента как при возрастании, так и при падении давления, выполнять градуировку. Для этого изготовлены образцы из сталей Ст 5, 45, У8 и армо-железа диаметром 16,5 и 21,5 мм, высотой 13 мм. Шероховатость поверхности, контактирующей с пуансоном, соответствовала шероховатости поверхности обкатываемых образцов – $R_a = 1,6$ мкм.

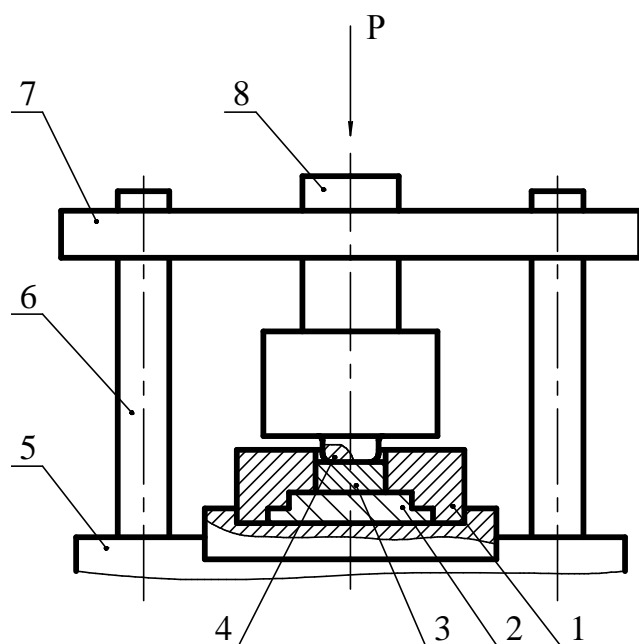


Рисунок 3. - Штамп для градуировки точечных мессдоз: 1 - матрица; 2 - вставка; 3 - образец; 4 - мессдоза; 5 - основание; 6 - стойка; 7 - верхняя плита; 8 - пуансон

При давлении на пуансон 8 (рис. 3) металл выдавливался в узкий кольцевой зазор между матрицей 1 и пуансоном. Данная схема деформации соответствовали полю линий скольжения для истечения металла в заусенец. Мессдозы в пуансоне располагались таким образом, чтобы торцы точечных мессдоз находились в местах среднего давления. В изготовленные сменные пуансоны ввинчивались рабочие мессдозы. Затем штифты шлифовались заподли-

цо с контактной поверхностью пуансона. Отверстия для штифтов мессдозы в пуансонах полностью соответствовали отверстиям во вкладышах ролика. Для проведения экспериментальных исследований изготовлены пуансоны как для радиальных, так и для наклонных (угол наклона выбран 30° относительно радиальной) точечных мессдоз. С целью проверки идентичности условий трения в каналах пуансонов и вкладышей мессдозы многократно последовательно нагружались и разгружались как в пуансонах, так и во вкладышах. Нагрузку производили сосредоточенной силой до различных значений при углах наклона мессдоз 30° . В этом случае реакция мессдозы соответствовала:

$$R = P \frac{\cos 30^\circ}{\cos 30^\circ} \pm mP \frac{\sin 30^\circ}{\cos 30^\circ}.$$

Таким образом:

$$R = P(1 \pm \mu \operatorname{tg} 30^\circ) \quad (2.1)$$

В уравнении (2.1) знак «минус» означает нагрузку, знак «плюс» - разгрузку. Исходя из уравнения (2.1), строили графики:

$$l = f(P), \quad l = RM,$$

где l - отклонение луча осциллографа от «0»-й линии; M - масштабный коэффициент; μ - коэффициент трения между штифтом мессдозы и каналом вкладыша.

Градуировку мессдоз производили сосредоточенной силой во вкладыше ролика на токарном станке модели 1К62. В собранном виде обкатной ролик 1 (рис. 4) крепится в патроне станка и поджимается центром. Нагрузка создается поперечным винтом суппорта до различных значений радиального удельного давления и передается на штифт мессдозы 2 посредством динамометра 3.

Создаваемое усилие регистрировалось индикатором 4. Градуировку мессдоз, расположенных в пуансоне, сосредоточенной силой производили на поперечно-строгальном станке модели 7Б36 аналогичным образом. На

поперечно-строгальном станке также производили градуировку радиальных мессдоз, расположенных во вкладыше сосредоточенной силой, направленной под углом 30° к оси, проведенной по радиусу ролика, устанавливая вкладыш соответствующим образом в тисках. На представленных (рис. 5) графиках верхняя ветвь кривых соответствует нагрузке, нижняя - разгрузке. Прямая ON является градуированной кривой для этих же мессдоз при нагружении их сосредоточенной силой вдоль оси штифта. Градуировочные кривые использовались для определения коэффициента трения между штифтами мессдоз и вкладышами, а также пуансонами. Кроме этого, представленные графики позволяли учитывать влияние сил трения между штифтом мессдозы и каналом на ход градуировочных кривых [6].

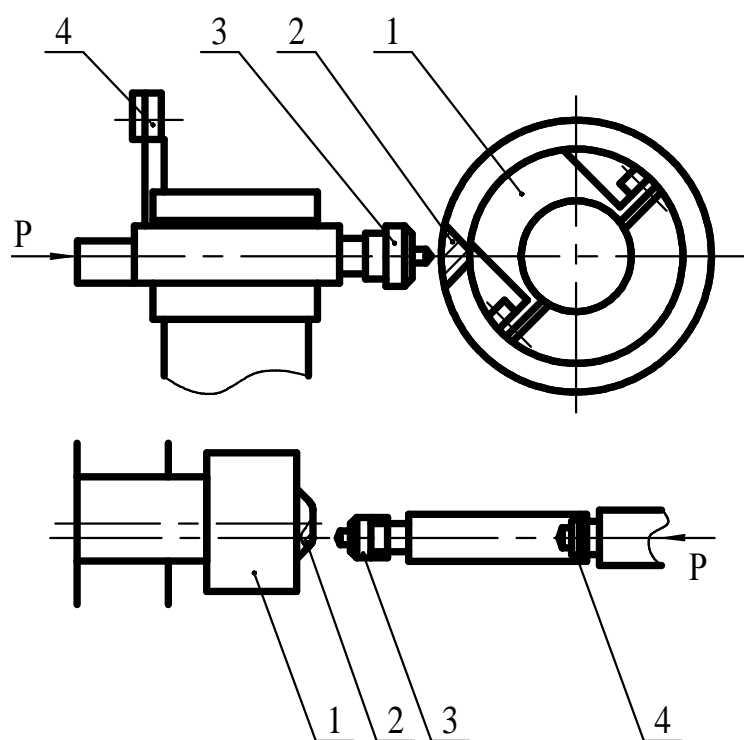


Рисунок 4.- Градуировка мессдоз сосредоточенной силой (мессдоза установлена во вкладыше ролика и в пуансоне)

полученные при нагружении мессдоз через металл.

Градуировку мессдоз производили на 30-тонной и 50-тонной ис-

Решая уравнение (1) относительно μ , определялся коэффициент трения между штифтом мессдозы и каналом, который соответствует: $\mu = 0,15$ как для вкладышей обкатного ролика, так и для пуансонов, что свидетельствует об идентичности условий трения в каналах вкладышей и пуансонов. При расшифровке осциллограмм использовались градуировочные графики,

пытательных машинах УИМ-30, УИМ-50. Изготовлено по два пуансона для радиальных и наклонных точечных мессдоз, диаметрами 15 и 20 мм. Общее давление, передаваемое на пуансон, регистрировалось по шкале испытательной машины. Зная контактную площадь пуансона F и общее давление P на пуансон, в любой момент выдавливания определялось удельное

давление, передающееся на штифт через металл: $r = \frac{F}{P}$.

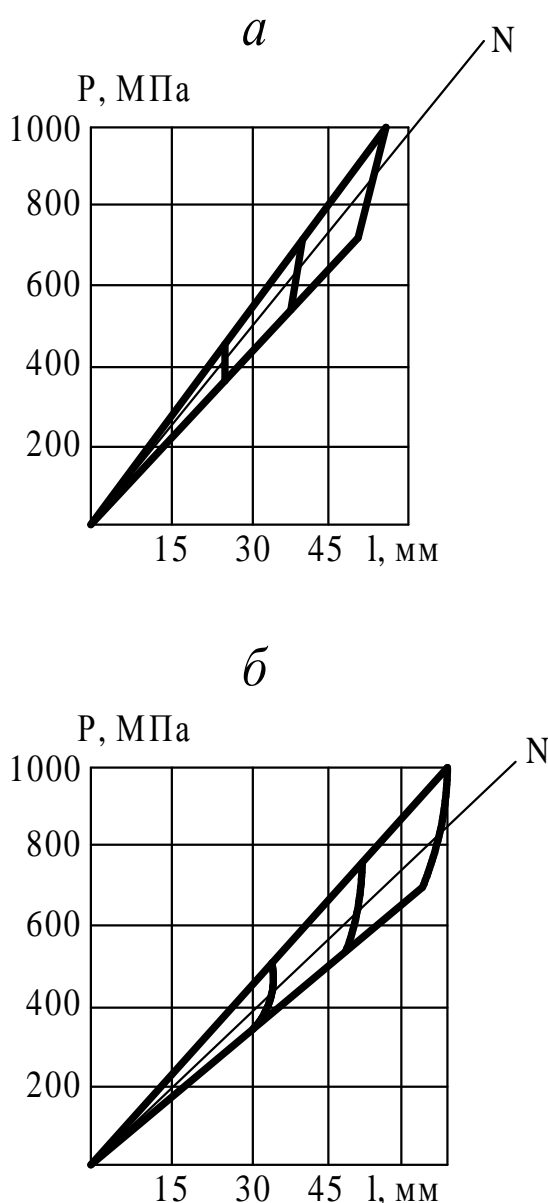


Рисунок 5. - Градуировка мессдоз сосредоточенной силой: а - мессдоза радиальная; б -

мессдоза наклонная

Нагрузки производились с усилиями до достиже-

ния необходимых значений радиальных удельных давлений как отождженных, так и предварительно наклепанных образцов 3 (рис. 3) с различными удельными давлениями и строились градуировочные кривые $l=f(P)$. Цилиндрические образцы диаметром 16,5 и 21,5 мм, высотой 13 мм изготавливались из сталей Ст 5, 45, У8 и армко-железа, как и образцы для проведения исследований [6]. На рисунке 6 представлены градуировочные кривые для радиальной мессдозы при нагружении через сталь до различных максимальных удельных давлений отождженной (кривая 1) и предварительно наклепанной (кривые 2, 3) сталей Ст 5 и 45. Такие же градуировочные кривые для наклонной мессдозы представлены на рисунке 7. Градуировочные кривые для точечных мессдоз строились и рассчитывались расчетным путем, зная предел текучести металла σ_T и градуировочный график мессдозы для сосредоточенной силы (прямая ON).

Если обрабатываемый материал обладает кривой упрочнения, близкой к характеристике жестко-пластического тела, то точка перегиба M и кривой OMB (рис. 6) соответствует $2,5 \sigma_T$. Таким образом, l_m определялась

$$\text{из соотношения: } l_m = (p_m - s_T) \frac{m}{tg \alpha_0},$$

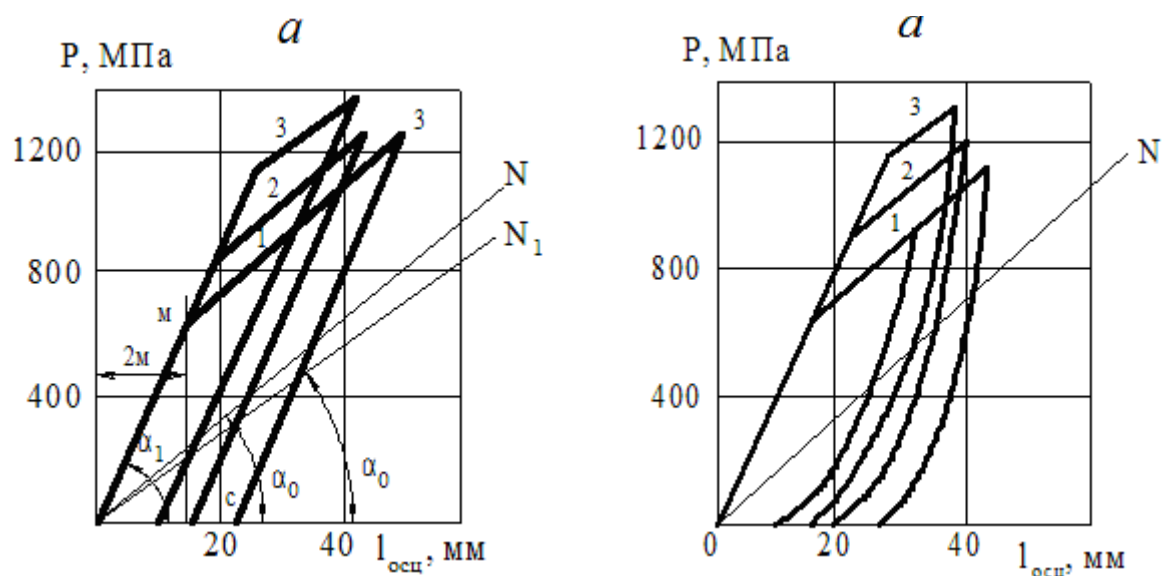
где l_m - отклонение луча, соответствующее давлению на мессдозу в точке перегиба M ; p_m - удельное давление, действующее на мессдозу в точке перегиба; m - коэффициент, зависящий от условий на входе в канал и трения в самом канале; σ_m - предел текучести металла; $tg \alpha_0$ - тангенс угла наклона прямой ON к оси Ol [6].

Разработанная формула справедлива для малоупрочняющихся или неупрочняющихся материалов при привлечении модели жестко-пластического материала. В общем случае прямая MB не параллельна ON , причем приращение угла наклона $\Delta \alpha_0$ по сравнению с α_0 определялось кон-

стантой пластического упрочнения. Так как учесть реологическое поведение тонкого поверхностного слоя при обкатывании представляется затруднительным, проводилась вышеописанная экспериментальная градуировка точечных мессдоз.

Таким образом, градуировочные кривые (рис. 6,7) позволяют сделать вывод о том, что реологическое поведение обкатываемого металла соответствует модели жестко-пластического упрочняющегося материала.

Прямая ON , соответствующая нагрузке мессдозы сосредоточенной силой наклонена к оси OI под углом $\alpha'_0 < \alpha_0$. При пластическом контакте движущегося шероховатого цилиндра с однородным полупространством, на площадке контакта существуют три зоны контактного трения: зона отставания, зона прилипания и зона опережения. Так как при обкатывании роликами наблюдается упрочнение тонкого поверхностного слоя, то данное упрочнение учитывается градуировочными кривыми мессдоз.



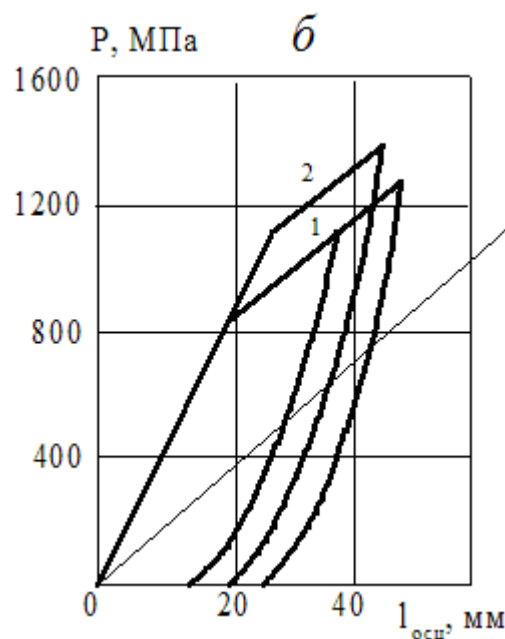
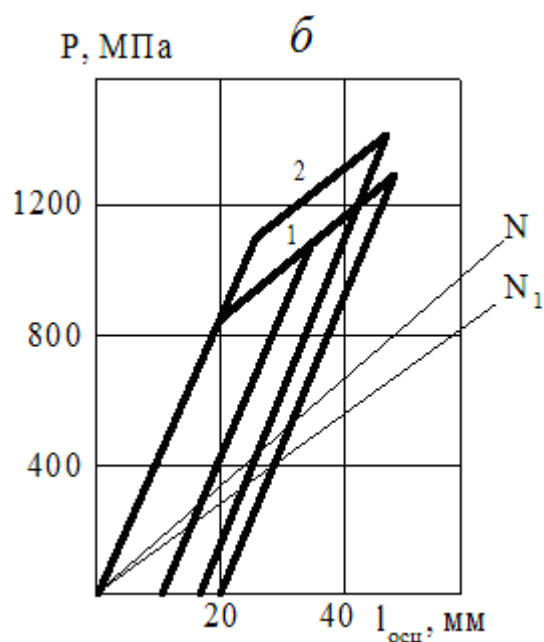


Рисунок 6. - Градуировочные кривые радиальной мессдозы: а - для стали Ст 5; б - для стали 45

Рисунок 7. - Градуировочные кривые наклонной мессдозы: а - для стали Ст 5; б - для стали 45

С целью обеспечения схемы плоской пластической деформации напряженное состояние рассматривалось в сечениях, где обеспечивались условия плоской пластической деформации. Так как в экспериментальных исследованиях применялся цилиндрический ролик, то условия плоской деформации обеспечивались в центральном и близком к центральному сечениях [6].

При исследовании углов установки ролика также пользовалась схема плоской деформации, с применением приближенного метода, используемая в теории упругости. Так как точечные мессдозы изготовлены диаметром 1,2 мм, то контактную площадку делили на тонкие полосы такой же толщины в направлении, параллельном качению. Затем к этим полосам применялась теория плоской деформации без учета их взаимодействия.

Используя схему плоской пластической деформации, получены формулы для определения удельных давлений и сил трения на основании уравнения равновесия сил, действующих по осям штифтов в процессе об-

катывания, с использованием схем сил (рис. 8), действующих на измерительные штифты мессдоз и расположенных под углом 30° относительно радиальной мессдозы. Так для зоны опережения в предположении, что штифты нагружаются, получено:

$$R_{1on} = p - m_1 p \frac{\sin 30^\circ}{\cos 30^\circ} - t \frac{\sin 30^\circ}{\cos 30^\circ} - m_1 t \frac{\cos 30^\circ}{\cos 30^\circ} = p - m_1 p \operatorname{tg} 30^\circ - t \operatorname{tg} 30^\circ - m_1 t.$$

Для радиальной мессдозы: $R_{2on} = p - \mu_2 \tau$.

Для наклонной мессдозы: $R_{3on} = p - \mu_3 p \operatorname{tg} 30^\circ + t \operatorname{tg} 30^\circ + \mu_1 t$.

$$R_{1om} = p - m_1 p \operatorname{tg} 30^\circ + t \operatorname{tg} 30^\circ + m_1 t;$$

Для зоны отставания $R_{2om} = p - m_2 t$;

$$R_{3om} = p - m_3 p \operatorname{tg} 30^\circ - t \operatorname{tg} 30^\circ - m_1 t.$$

где p - удельное давление обкатывания, действующее на измерительный штифт мессдозы; τ - удельная касательная сила трения, действующая на измерительный штифт мессдозы; μ_1, μ_2, μ_3 - коэффициенты трения в каналах вкладыша; R_1, R_2, R_3 - реакции мессдоз.

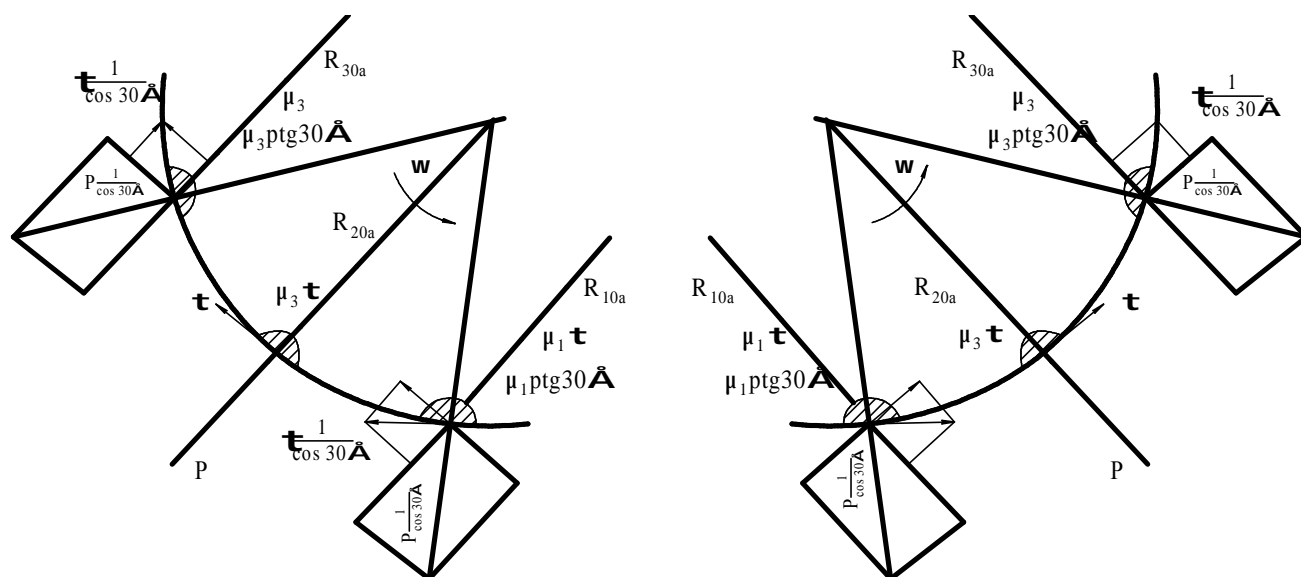


Рисунок 8. - Схемы сил, действующих на измерительные штифты мессдоз: а - для зоны опережения, б - для зоны отставания

Если штифты, шлифованные под углом 30° к радиусу ролика или заподлицо с поверхностью ролика, нагружать статически сосредоточенной удельной силой p , направленной по радиусу ролика, то уравнение равно-

веса сил, действующих по осям штифтов соответствует:

$$R_1 = p_i \frac{\cos 30^\circ}{\cos 30^\circ} \pm m_1 p_i \frac{\sin 30^\circ}{\cos 30^\circ}.$$

Таким образом: $R_1 = p_i (1 \pm \mu_1 \operatorname{tg} 30^\circ)$; $R_2 = p_i$; $R_3 = p_i (1 \pm \mu_3 \operatorname{tg} 30^\circ)$.

В полученных уравнениях знак «минус» означает нагрузку, знак «плюс» - разгрузку. Коэффициенты трения μ_1 , μ_2 , и μ_3 в каналах определены при градуировке мессдоз сосредоточенной силой как для вкладышей, так и для пуансонов оказались равными: $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 0,15$.

Тогда, заменяя R_1 , R_2 , R_3 значениями сил P_1 , P_2 , P_3 соответствующими ординатами осциллограмм, расшифрованными по градуировочным графикам, определились удельные нормальные давления и силы трения.

Для зоны опережения:

$$P_1(1 - \mu \operatorname{tg} 30^\circ) = p - \mu p \operatorname{tg} 30^\circ - \tau \operatorname{tg} 30^\circ - \mu_1 \tau;$$

$$P_2 = p - \mu \tau;$$

$$P_3(1 - \mu \operatorname{tg} 30^\circ) = p - \mu p \operatorname{tg} 30^\circ - \tau \operatorname{tg} 30^\circ + \mu \tau.$$

Для зоны отставания:

$$P_1(1 - \mu \operatorname{tg} 30^\circ) = p - \mu p \operatorname{tg} 30^\circ + \tau \operatorname{tg} 30^\circ - \mu_1 \tau;$$

$$P_2 = p - \mu \tau;$$

$$P_3(1 - \mu \operatorname{tg} 30^\circ) = p - \mu p \operatorname{tg} 30^\circ - \tau \operatorname{tg} 30^\circ - \mu \tau.$$

Решая попарно полученные уравнения и, подставив численные значения ($\mu = 0,15$; $\operatorname{tg} 30^\circ = 0,577$), можно определить удельные давления и силы трения в зонах отставания и опережения:

Для зоны опережения:

$$p = \frac{P_{1on} + P_{3on}}{2}; \quad t = \frac{P_{3on} - P_{1on}}{1,6};$$

$$p = \frac{5,33 P_{2on} + P_{3on}}{6,33}; \quad t = \frac{P_{3on} - P_{2on}}{0,95};$$

$$p = \frac{5,33 P_{2on} - P_{1on}}{4,33}; \quad t = \frac{P_{2on} - P_{1on}}{0,65}.$$

Для зоны отставания:

$$p = \frac{P_{1om} + P_{3om}}{2}; \quad t = \frac{P_{1om} - P_{3om}}{1,6};$$

$$p = \frac{P_{1om} - P_{3om}}{4,33}; \quad t = \frac{P_{2om} + P_{3om}}{0,65};$$

$$p = \frac{5,33 P_{2om} - P_{1om}}{6,33}; \quad t = \frac{P_{1om} - P_{2om}}{0,95}.$$

Вкладыши ролика изготовлены с одной радиальной и одной наклонной мессдозами, обкатывание роликами проводилось и в прямом и обратном направлениях, а затем осуществлялась обработка осциллограмм.

Таким образом, расчет удельных нормальных давлений и контактных сил трения можно производить по показаниям нескольких мессдоз, что позволяет проверить работу оснастки и аппаратуры. Результаты оказались идентичными, что говорит о стабильной работе аппаратуры и оснастки.

Библиографический список

1. Суслов А.Г., Дальский А.М. /Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.
2. Технология изготовления деталей машин /А.М. Дальский, А.Г. Суслов, Ю.Ф. Назаров и др.: Под общ. ред. А.Г. Суслова. – М: Машиностроение, 2000. – 840 с.
3. Остаточные напряжения /Ж.А. Мрочек, С.С. Макаревич, Л.М. Кожуро и др.; Под ред. С.С. Макаревича. – Мн.: УП «Техно-принт», 2003. – 352 с.
4. Горохова М.Н., Барковский Ю.Б. // Комбинированный метод электромагнитной наплавки и поверхностного пластического деформирования. Ремонт, восстановление, модернизация. – Москва, 2007. - №1. - С. 12-14.
5. Горохова М.Н. Граничные условия при обкатывании роликами при комбинации наплавки и пластического деформирования // Сборник докладов и материалов 9 конгресса «Кузнец – 2009»: «Состояние, проблемы и перспективы развития кузнечно-прессового машиностроения, кузнечно-штамповочного производства и обработки материалов давлением». – Рязань: ОАО «Тяжпрессмаш», 2009. - С. 221-225.