А. Д. Учитель /д. т. н./, А. Н. Панченко /к. т. н./

Национальная металлургическая академия
Украины, г. Днепро, Украина

Ю. А. Малиновский /к. т. н./,

Криворожский колледж НАУ, г. Кривой Рог,
Украина

Г. В. Данилина /к. т. н./, С. Ю. Даценко

Предпосылки к возникновению автоколебательных и волновых процессов в формообразующих машинах при обработке заготовок и деталей методом пластического деформирования

A. D. Uchitel /Dr. Sci. (Tech.)/,
A. N. Panchenko /Cand. Sci. (Tech.)/National Metallurgical Academy of Ukraine,
Dnipro, UkraineYu. A. Malinovsky /Cand. Sci. (Tech.)/,
G. V. Danilina /Cand. Sci. (Tech.)/, S. Y. Datsenko

Krivoy Rog NAU College, Krivoy Rog, Ukraine

Background to the arrangement of automating and volvous processes in the form-forming machines when treating the preparations and details by the plastic deformation method

Цель. Анализ поверхностно-упрочняющей технологии холодной обработки металлов с учетом деформационно-волновых процессов? возникающих в области перед формообразующим инструментом.

Методика исследований. Для установления причин получения готовых изделий с повышенной шероховатостью, недостаточной контактной прочностью, трещиноватостью и шелушением поверхностных слоев, а также возникновения значительных динамических нагрузок в механизмах машин для обработки деталей методами пластического деформирования использована двухмассовая расчетная модель, в которой рабочий инструмент связан силами трения с движущейся обрабатываемой заготовкой.

Результаты. Представлены результаты по определению условий возникновения автоколебаний в системе «обрабатываемая заготовка – инструмент». На основании анализа характеристики трения как функции от скорости взаимного проскальзывания между обрабатываемой заготовкой и формообразующим инструментом установлен диапазон скоростей проскальзывания, при которых возможно возбуждение автоколебательных процессов для фрикционной пары: «инструмент – обрабатываемая заготовка».

Научная новизна состоит в том, что установлено влияние переменной силы трения на возникновение незатухающих автоколебаний между обрабатываемой заготовкой и инструментом в машинах для «холодного» пластического деформирования металла. Найдены условия возникновения и отсутствия автоколебаний в зоне контакта инструмента и заготовки.

Практическая значимость состоит в том, что выявлены режимы эксплуатации машин для обработки изделий методом пластического деформирования, при которых могут возникнуть нерегламентируемая шероховатость, трещиноватость и «шелушение» обрабатываемых деталей, а также высокий динамический фон при работе формообразующего инструмента приводных и силовых механизмов. Даны практические рекомендации по улучшению эксплуатационных качеств готовых изделий и снижения виброактивности в приводе. (Ил. 3. Библиогр.: 6 назв.)

Ключевые слова: обкатка, волочение, накатка, пластическая деформация, упругая волна деформации, ролик, инструмент, заготовка.

DOI: 10.33101/S063456734

Постановка проблемы. Исследования вопросов, связанных с повышением качества готовых изделий на механизмах для обработки полуфабрикатов и готовых изделий методами пластического деформирования, выполненное рядом авторов [1], показали, что на практике не всег-

да удается получить качественную поверхность изделия при его обработке обкаткой и волочением. В этих работах не исследовалось влияние переменного трения в зоне формообразования. Повышение качества поверхностных слоев заготовок является актуальным научно-техническим

направлением совершенствования упомянутых процессов.

В промышленности применяются механические способы поверхностно-упрочняющей обработки металлов, которые ведут к повышению долговечности изделий и деталей (накатка, холодная прокатка, дробеструйная обработка), основанные на наклепе поверхностных слоев детали на значительную глубину (до нескольких миллиметров).

При этом поверхностные слои деталей находятся под воздействием остаточных напряжений сжатия, а нижележащие слои – под воздействием остаточных растягивающих напряжений. Процесс обкатки осуществляется путем перемещения по обрабатываемой поверхности вращающегося ролика под определенным давлением.

Обкатку применяют в тех случаях, когда необходимо значительно повысить усталостную прочность деталей с сохранением или повышением класса чистоты обрабатываемой поверхности. Существуют упрочняющие и упрочняюще-сглаживающие обкатки.

При упрочняющей обкатке, которую производят при высоких удельных давлениях, достигается повышение глубины наклепа с большими остаточными напряжениями сжатия в упрочненном слое, шероховатость поверхности при этом возрастает [1].

Упрочняюще-сглаживающая обкатка, наряду с повышением усталостной прочности, обеспечивает снижение исходной шероховатости (на 2–3 класса). При применении этого метода в ряде случаев можно исключить шлифование.

Аналогичные явления происходят при холодной прокатке различных деталей и профилей для получения заданной геометрии, более высокой точности и чистоты обрабатываемой поверхности, а также улучшения механических свойств поверхностных слоев металла, проявляющихся при прокатке лент, листов, длинных профильных деталей.

Большой интерес представляет процесс волочения для получения круглых, квадратных и фасонных профилей. Этот процесс может выполняться на неподвижных (цельных и составных волоках), также на роликовых (вращающихся) волоках. Процесс волочения позволяет повысить прочность изделий (по пределу текучести) в 1,5–2 раза, усталостную прочность до 7–9 раз, износостойкость до 2–5 раз.

В результате применения поверхностной обработки образуется накатанный слой определенной толщины. Для определения толщины этого слоя при обкатывании или волочении цилиндрическими волоками пользуются приближенными формулами. Согласно одной из них глубина на-

клепанного слоя прямо пропорциональна корню квадратному из величины действующей вертикальной нагрузки и обратно пропорциональна корню квадратному из предела текучести материала. При этом глубина накатанного слоя может изменяться в пределах $0 \leq \delta \leq 25$ мм, твердость увеличивается на 40÷50 %, предел усталости детали повышается на 80 % и более [1].

Отметим, что чрезмерное увеличение давления может привести к перенаклепу поверхности, ее шелушению и отслаиванию.

Исходя из характера взаимодействия инструмента и обрабатываемой детали при обкатке и волочении, возникающая волна сжатия верхних слоев материала в зоне перед роликами или волокой формирует остаточные деформации, обусловленные местной потерей упругой устойчивости.

Совершенно аналогично при пропуске заготовки через неподвижную волоку в зоне деформации (перед волокой) происходит волнообразование по всем соприкасающимся граням инструмента и заготовки, сопровождающееся местной потерей устойчивости поверхностных слоев. При этом величина коэффициента обжатия при волочении ограничивается прочностью протянутой части и отсутствием самовозбуждающихся колебаний на гранях волоки.

Из этих соображений следует, что для каждого пропуска заготовки необходимо определить усилие волочения. После определения усилия волочения целесообразно проверить нагрузки на гранях волоки, которые могут привести к потере продольной устойчивости. При нестационарном трении в зоне взаимодействия инструмента и подаваемой заготовки в системе «инструмент – обрабатываемая деталь (заготовка) – привод» развиваются незатухающие автоколебания, которые в ряде случаев приводят к трещинам и хрупкому разрушению в поверхностных слоях обрабатываемых деталей, на участках, предшествующих их взаимодействию с формообразующим инструментом. Указанные процессы приводят также к возникновению динамических нагрузок, которые являются причиной отказов деталей приводов и силовых механизмов в связи с возникновением колебаний в заготовке, принудительно подаваемой формообразующими элементами машин.

При взаимодействии инструмента с заготовкой на последней, в результате потери упругой устойчивости поверхностных слоев материала, в зоне перед инструментом образуется деформированная волновая поверхность фиксированной длины (l), которая является стационарной относительно движущейся части готового изделия (со скоростью V_n); при внезапном приложении в начальный момент сжимающего усилия к заготовке

происходит потеря продольной устойчивости наружных слоев со скоростью распространения волны сжатия (V_a), причем $V_a \gg V_{\text{п}}$. Волна сжатия, сформированная волна отражения затухают в массиве металла. Волна же деформации является формой потери продольной устойчивости поверхностных слоев заготовки (или формой поперечных колебаний ее поверхностных слоев). При этом вид волны деформации является сформировавшимся и необратимым.

Рассмотрена механика взаимодействия инструмента с деформируемым материалом в зоне очага деформации заготовки.

Нагрузки при взаимодействии формообразующего инструмента (жесткого ролика) с деформируемой (по дуге контакта) заготовкой показаны на рис. 1.

Рис. 1. Схема взаимодействия инструмента и обрабатываемой заготовки

В случае определения технологических нагрузок при захвате заготовки роликом для различных этапов процесса обкатки применяют различные формулы; так, например, на этапе для подачи полосы со скоростью $V_{\text{п}}$, превышающей горизонтальную проекцию скорости ролика, момент при обкатке принимают равным [2]:

$$M = -2fFbR^2\alpha, \quad (1)$$

где f – коэффициент трения скольжения между заготовкой и роликом;

F – среднее давление ролика на заготовку;

b – ширина полосы;

R – радиус ролика.

На этапе торможения ролика и полосы при отсутствии упругой связи момент нагрузки принимают равным:

$$M = 2\tau_k b R^2 \alpha, \quad (2)$$

где τ_k – средняя удельная сила трения покоя на контактной поверхности;

α – угол заполнения очага деформации металлом.

На этапе сплошного буксования ролика при неподвижной полосе:

$$M = 2FR\mu. \quad (3)$$

В приведенных зависимостях прямо или косвенно присутствует коэффициент трения.

Как известно, коэффициент трения не является постоянной величиной, а является некоторой функцией скорости скольжения между роликом и заготовкой. Как следует из данных работ [2], коэффициент трения скольжения имеет тенденцию к уменьшению с увеличением скорости скольжения, при этом между полосой и роликом, а также в приводе станка могут возникать фрикционные автоколебания (рис. 2).

Рис. 2. Характеристика трения скольжения между заготовкой и инструментом как функция скорости скольжения V

Обратимся к обобщенной характеристике трения [2]:

$$f = f_0 - aV + bV^3, \quad (4)$$

где $f = f(V)$ – коэффициент трения, который является некоторой функцией от скорости скольжения ролика по движущейся или остановленной заготовке;

V – скорость скольжения;

a, b – некоторые коэффициенты.

Главной особенностью характеристики трения в виде (4) является наличие «ниспадающего» участка (рис. 2) или наличие отрицательного демпфирования.

Так как (4) является функции V , то можно найти минимум функции при $\frac{df}{dV} = 0$, откуда вычислим значение критической скорости, которая соответствует минимальному значению f , тогда:

$$f_{\min} = f_0 - aV_{\text{кр}} + bV_{\text{кр}}^3, \quad (5)$$

где $V_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{a}{3b}}$.

С учетом выражений (4), (5) коэффициент в формуле (4) удобно представить в следующем виде:

$$a = 3(f_0 - f_{\min})/2V_{\text{кр}};$$

$$b = (f_0 - f_{\min})/2V_{\text{кр}}^3. \quad (6)$$

Тогда формула (4) приобретет вид:

$$f = f_0 - \frac{3}{2}(f_0 - f_{\min}) \frac{V}{V_{кр}} + \frac{f_0 - f_{\min}}{2} \left(\frac{V}{V_{кр}} \right)^3. \quad (7)$$

Выражение (7) можно рассматривать как работу единичной силы трения на единичном перемещении при некоторой относительной скорости

$$\xi = \frac{V}{V_{кр}} \text{ скольжения.}$$

Если обратиться к характеристике трения $f = f(V)$, то при скорости $V = 0$ – полное отсутствие скольжения, материал перемещается роликом без пробуксовки. При движении вдоль оси ОХ вправо, в сторону возрастания V , когда $\xi < 1$, на значение f существенно влияют только два слагаемых (7), причем в системе присутствует отрицательное затухание. В процессе деформации заготовки на малых скоростях скольжения (V), $V < V_{кр}$ возникают автоколебания. Определим наименьшее значение скорости скольжения, при которой первые два слагаемые (7) дают отрицательную разность. Таким образом, когда относительная скорость скольжения находится в интервале, обеспечивающем отрицательную разность (7), в системе «заготовка – ролик – привод» развиваются автоколебания. Приравнявая первые два слагаемые (7), находим значение относительной скорости, при которой начинается пробуксовка, и в системе возможно возбуждение автоколебаний.

$$\frac{3}{2}(f_0 - f_{\min}) \frac{V}{V_{кр}} = f_0. \quad (8)$$

Тогда:

$$V_* = \frac{2f_0}{3(f_0 - f_{\min})} V_{кр}. \quad (9)$$

Скорость скольжения V_* (скорость начала пробуксовки) является нижней границей скорости скольжения, при которой начнутся автоколебания. В этом случае относительная скорость скольжения пока мала и влияние третьего слагаемого (7) на работу сил трения еще невелико, при этом пробуксовка будет значительной. Если скорость пробуксовки V равна скорости ролика V_b , то такой технологический процесс будет неприемлемым, но при этом возможность автоколебаний будет полностью исключена. Таким образом, если скорость движения заготовки находится в пределах:

$$\frac{2f_0}{3(f_0 - f_{\min})} V_{кр} \leq V \leq \sqrt{3} V_{кр}, \quad (10)$$

то в системе возможно появление автоколебательных режимов.

Оценим влияние третьего слагаемого на автоколебательный процесс. Это слагаемое представ-

ляет собой нелинейное затухание. Полагая, что влияние этого слагаемого начинает проявляться при значительных скоростях скольжения и это позволяет считать, что второе и третье слагаемые значительно превышают первое, тогда, приравнявая второе и третье слагаемые, получаем:

$$V_{**} = \sqrt{3} V_{кр}. \quad (11)$$

Это означает что при скоростях скольжения $V_{**} > 1,7 V_{кр}$ в системе невозможно самовозбуждение автоколебаний, однако при таких скоростях скольжения нарушается технологический процесс (обкатка, прокатка, волочение).

Рассмотрим процесс развития автоколебаний в системе «ролик и движущаяся заготовка». При наличии трения скольжения согласно (9) на вращающийся с постоянной угловой скоростью ролик действует момент трения M_T , который наиболее часто представляют в виде $M_T = 2fFbR^2\alpha$, (формула 1), (см. рис. 1), где:

$f = f(V)$ – характеристика трения (формула 4);

F – среднее давление металла на ролик;

b, h, l – размеры заготовки;

τ – удельная сила трения;

α – угол заполнения очага деформации металлом;

α_0 – угол захвата;

R – радиус ролика;

x – перемещение полосы на входе;

m – масса полосы.

Рассмотрим связанные процессы движения полосы при захвате ее роликом (роликами).

Укрупненно можно представить ролик с приводными механизмами и двигателем в виде крутильной двухмассовой системы, состоящей из двух роторов, соединенных между собой крутильной жесткостью C (рис. 3). Связующим элементом между вращающимся с некоторой угловой частотой ω роликом (которая не всегда будет постоянной) и заготовкой является момент сил трения согласно [3].

С другой стороны, этот момент сил трения в виде касательного усилия воспринимается обрабатываемой заготовкой, которая после прохождения формообразующего инструмента продолжает поступательное движение со скоростью $V_{п.}$ Вместе с тем непостоянное касательное усилие в зоне дуги контакта ролика и заготовки, обусловленное характеристикой трения (7), создает предпосылки возникновения автоколебаний в крутильной двухмассовой системе. Кроме того, непостоянное касательное усилие воспринимается наружными слоями заготовки в начале дуги контакта и вызывает в них деформационно-волновые процессы, приводящие к поверхностному трещинообразованию и хрупкому разрушению.

Принципиальную расчетную схему заготовки, ролика и привода представим в виде (рис. 3).

Рис. 3. Взаимодействие заготовки с системой «ролик – приводной механизм – двигатель»: ω_0 – угловая частота вращения двигателя, φ – угол поворота приводного вала, c – жесткость приводного вала, α_0 – угол захвата заготовки инструментом, R – радиус вала, V_{π} – скорость процесса формирования детали, J_1 – момент инерции ротора двигателя при $\omega_0 = \omega$, $J_1 = \infty$, h , b , l – размеры заготовки

Для описания процесса механического взаимодействия инструмента с обрабатываемой заготовкой и приводом предварительно будем считать, что ведущее звено волочильной машины, обкаточного приспособления прокатного стана (приводной вал двигателя) будет вращаться с постоянной угловой частотой ω_0 . В то же время угловая частота вращения ролика ω вследствие переменной характеристики трения $f = f(V)$ (формула 7) будет совершать «гармонические» колебания относительно номинального значения ω_0 с амплитудой $2\Delta\omega$.

В таком случае совместную систему уравнений движения ролика с заготовкой и приводом можно записать в форме [3].

Для описания автоколебательных режимов в системе «заготовка – ролик – привод» необходимо представить заготовку в виде сосредоточенной массы m на пружине с жесткостью c_0 , соединенной силами трения с инструментом (роликами). А ролик с моментом инерции J , ротором двигателя с моментом инерции J_1 , соединенных валом с крутильной жесткостью C (рис. 3), представить в виде двухмассовой колебательной системы, тогда будем иметь:

$$\begin{cases} J\ddot{\varphi} + c(\varphi - \omega_0 t) = -2fFb\alpha R^2 \\ m\ddot{x} + c_1x = +2fFb\alpha R. \end{cases} \quad (12)$$

Система (12) является совместной через коэффициент трения f в виде:

$$f = f_0 - \frac{3}{2}(f_0 - f_{\min}) \frac{\dot{\varphi} R - \dot{x}}{\varphi R - x_{кр}}; \quad (13)$$

Если пренебречь в линеаризованной характеристике трения колебаниями угловой скорости ролика, то есть допустить, что $\dot{\varphi} = \omega_0 = \text{const}$, то характеристика трения будет представлена следующим образом:

$$f = f_0 - \frac{3}{2}(f_0 - f_{\min}) \frac{\omega_0 R - \dot{x}}{\omega_0 R - x_{кр}}. \quad (14)$$

Тогда система уравнений является распадающейся, при этом учитываем, что при автоколебаниях полосы характеристика трения имеет вид (14), а при автоколебаниях привода стана характеристику трения представим в виде:

$$f = f_0 - \frac{3}{2}(f_0 - f_{\min}) \frac{\dot{\varphi} R - V_{\pi}}{\varphi R - x_{кр}}. \quad (15)$$

С учетом соотношений (14) и (15) запишем систему (12):

$$\begin{cases} J\ddot{\varphi} + c(\varphi - \omega_0 t) = \left(-2f_0 + 3(f_0 - f_{\min}) \frac{\dot{\varphi} R - V_{\pi}}{V_{кр}} \right) Fb\alpha R^2 \\ m\ddot{x} + c_1x = \left(2f_0 - 3(f_0 - f_{\min}) \frac{\omega_0 R - V_{\pi}}{V_{кр}} \right) Fb\alpha R \end{cases} \quad (16)$$

Первое уравнение системы представляет собой уравнение вращательного движения ролика при взаимодействии с полосой, при этом принято допущение, что скорость движения валков может изменяться около своего среднего значения, а скорость полосы постоянна ($V_{\pi} = \text{const}$).

Из вида уравнения (16.1) следует, что вследствие податливости привода скорость вращения ролика может колебаться около среднего значения, а угловая скорость второй сосредоточенной массы привода (ротора двигателя) является постоянной (ω_0), то есть механическая характеристика двигателя является абсолютно жесткой. Отметим, что для расчета деталей привода на прочность и снижения динамических нагрузок на приводные механизмы необходимо рассмотреть момент инерции двигателя J_1 , угол поворота ротора φ_1 и ввести дополнительное уравнение в систему (16), то есть будет иметь место система с двигателем ограниченной мощности [4].

Первое уравнение (16) является независимым и из-за наличия слагаемого c с отрицательным затуханием, тогда при скорости скольжения $V \geq V_*$

в системе могут возникать автоколебания [5]. Обращаясь по второму уравнению системы, и если при этом скольжение заготовки относительно ролика удовлетворяет неравенству $V \geq V_*$, то скорость движения заготовки ($\dot{x}$) может колебаться относительно своего номинального значения вследствие наличия в системе отрицательного демпфирования, которое в этом случае приводит к возникновению автоколебаний полосы, представленной объектом с сосредоточенной массой m и жесткостью c_1 .

В целом каждое уравнение системы (16) в правой части содержит постоянное слагаемое и слагаемое, пропорциональное первой степени скорости проскальзывания вала по заготовке, которое характеризует отрицательное демпфирование.

Решение каждого из уравнений системы будет содержать постоянную компоненту и колебательную составляющую с возрастающими амплитудами. Кроме того, в решении первого уравнения будет содержаться составляющая, пропорциональная времени ($\omega_0 t$). Отметим, что в реальной системе амплитуды колебаний для $\varphi = \varphi(t)$ и $x = x(t)$ не возрастают до бесконечности (так как в характеристике трения (7) при решении (16) не учтено слагаемое, пропорциональное V^3). Так как с увеличением скорости проскальзывания V влияние нелинейного затухания возрастает пропорционально V^3 , поэтому амплитуды колебаний не достигают бесконечно больших значений.

Рассмотрим отдельно второе уравнение системы (16) в виде:

$$\ddot{x} + \frac{c_1}{m} \dot{x} = + \left(2f_0 - 3(f_0 - f_{\min}) \frac{\omega_0 R - \dot{x}}{V_{kp} m} \right) Fb\alpha R.$$

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} \frac{c_1}{m} &= \beta_1; \\ \left(2f_0 - 3(f_0 - f_{\min}) \frac{\omega_0 R - \dot{x}}{V_{kp} m} \right) Fb\alpha R &= \beta_2; \\ 3 \frac{(f_0 - f_{\min})}{m V_{kp}} Fb\alpha R &= \beta_3. \end{aligned}$$

Тогда уравнение колебаний стержня представим следующим образом:

$$\ddot{x} - \beta_3 \dot{x} + \beta_1 x = \beta_2. \quad (17)$$

$$x(t) = e^{\frac{3}{2} \left(\frac{f_0 - f_{\min}}{m V_{kp}} \right) Fb\alpha R t} \cdot \frac{V_{\Pi} \sin \sqrt{\frac{c_1}{m} - \frac{9}{4} \left(\frac{f_{\min}}{m V_{kp}} Fb\alpha R \right)^2} t}{\sqrt{\frac{c_1}{m} - \left(\frac{2f_0}{m} Fb\alpha R - 3(f_0 - f_{\min}) \frac{\omega_0 R}{m V_{kp}} Fb\alpha R \right)^2} \frac{1}{4}} + \frac{2f_0}{c_1} Fb\alpha R - 3 \frac{(f_0 - f_{\min}) \omega_0 R}{c_1 V_{kp}} Fb\alpha R. \quad (25)$$

Запишем общее решение однородного уравнения (17), для этого предварительно вычислим корни характеристического уравнения:

$$\lambda^2 - \beta_3 \lambda + \beta_1 = 0. \quad (18)$$

Решая (19), получим:

$$\lambda_{1,2} = \frac{\beta_3}{2} \pm \sqrt{\frac{\beta_3^2}{4} - \beta_1}. \quad (19)$$

Следовательно:

$$\tilde{x}(t) = e^{\frac{\beta_3}{2} t} (A \cos pt + B \sin pt), \quad (20)$$

где $p = \sqrt{\beta_1 - \frac{\beta_3^2}{4}}$ – собственная частота колебаний заготовки, представленной сосредоточенной массой на «пружине» с жесткостью c_1 (которая равна $c_1 \approx EF$).

Частное решение уравнения (17) ищем по форме правой части (17):

$$\tilde{x} = D = \text{const},$$

тогда:

$$\beta_1 D = \beta_2; \quad D = \frac{\beta_2}{\beta_1}. \quad (21)$$

Общее решение (17) ищем в виде суммы общего решения однородного уравнения (20) и частного решения неоднородного уравнения (21).

Постоянные A, B определим из начальных условий $x(0) = 0; \dot{x}(0) = V_B$. Для выполнения первого условия необходимо потребовать $A \equiv 0$. Тогда:

$$\tilde{x}(t) = e^{\frac{\beta_3}{2} t} B \sin pt. \quad (22)$$

Постоянную B находим из второго начального условия:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}(t) &= \frac{\beta_3}{2} e^{\frac{\beta_3}{2} t} B \sin pt + e^{\frac{\beta_3}{2} t} B p \cos pt; \\ \dot{\tilde{x}}(0) &= \frac{\beta_3}{2} e^{\frac{\beta_3}{2} \cdot 0} B \cdot 0 + e^{\frac{\beta_3}{2} \cdot 0} B p \cos p \cdot 0 = B p \cdot 1 = V_{\Pi}; \\ B &= \frac{\sqrt{V_{\Pi}}}{p} = \frac{V_{\Pi}}{\sqrt{\beta_1 - \frac{\beta_3^2}{4}}}. \end{aligned} \quad (23)$$

Тогда общее решение (17) запишем в виде:

$$x(t) = \tilde{x}(t) + \tilde{x}(t) = e^{\frac{\beta_3}{2} t} \frac{V_B}{\sqrt{\beta_1 - \frac{\beta_3^2}{4}}} \sin pt + \frac{\beta_2}{\beta_1}. \quad (24)$$

Рассмотрим первое уравнение системы (16) при условии, что скорость перемещения полосы при ее взаимодействии с роликом является величиной постоянной, тогда уравнение для определения относительного угла поворота ролика (φ) примет вид:

$$\ddot{\varphi} + \frac{c}{J} \varphi - 3(f_0 - f_{\min}) \frac{F b \alpha R^3}{V_{кр} J} \dot{\varphi} = \frac{c}{J} \omega_0 t - \left(2f_0 - 3(f_0 - f_{\min}) \frac{V_0}{V_{кр}} \right) F \frac{b \alpha R^2}{J}. \quad (26)$$

Или с учетом принятых обозначений:

$$\ddot{\varphi} - \gamma_1 \dot{\varphi} + \gamma_2 \varphi = \gamma_1 \omega_0 t - \gamma_3, \quad (27)$$

где:

$$\gamma_1 = 3(f_0 - f_{\min}) \frac{F b \alpha R^3}{V_{кр} J};$$

$$\gamma_2 = \frac{c}{J};$$

$$\gamma_3 = \left(2f_0 - 3(f_0 - f_{\min}) \frac{V_{\Pi}}{V_{кр}} \right) F \frac{b \alpha R^2}{J}.$$

Характеристическое уравнение для однородного уравнения (27) имеет вид:

$$\lambda^2 - \gamma_1 \lambda + \gamma_2 = 0. \quad (28)$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{\gamma_1}{2} \pm \sqrt{\frac{\gamma_1^2}{4} - \gamma_2}. \quad (29)$$

Полагаем, что $\gamma_2 > \frac{\gamma_1^2}{4}$, тогда корни (29) будут комплексно сопряжены, и решение получим в виде (для однородного уравнения):

$$\tilde{\varphi}(t) = e^{\frac{\gamma_1}{2} t} (A_1 \cos P_1 t + B_1 \sin P_1 t). \quad (30)$$

Так как $\tilde{\varphi}(0) = 0$; $\dot{\tilde{\varphi}}(0) = \omega_0$, то $A_1 = 0$, тогда $B_1 \neq 0$:

$$\tilde{\varphi}(t) = e^{\frac{\gamma_1}{2} t} B_1 \sin P_1 t. \quad (31)$$

Частное решение (27) ищем в виде:

$$\tilde{\varphi}(t) = A_2 t + B_2. \quad (32)$$

Подставим (32) в исходное уравнение (26):

$$-\gamma_1 A_2 + \gamma_2 (A_2 t + B_2) = \gamma_1 \omega_0 t - \gamma_3, \\ \text{при } t=0 \quad -\gamma_1 A_2 + \gamma_2 B_2 = -\gamma_3.$$

Находим $\dot{\varphi}(t)$, тогда $A_2 = \omega_0$ и $-\gamma_1 \omega_0 + \gamma_2 B_2 - \gamma_3$, откуда $B_2 = \frac{\gamma_1 \omega_0 - \gamma_3}{\gamma_2}$.

С учетом найденных констант:

$$\varphi(t) = \tilde{\varphi}(t) + \tilde{\varphi}(t) = e^{\frac{\gamma_1}{2} t} B_1 \sin P_1 t + \omega_0 t + \frac{\gamma_1 \omega_0 - \gamma_3}{\gamma_2}. \quad (33)$$

Полученное решение (28) содержит гармоническую составляющую, амплитуды которой возрастают по экспоненциальному закону, причем это решение накладывается на линейно возрастающую функцию угла поворота при непрерывном вращении ролика. Кроме того, в решении присутствует некоторая постоянная, обусловленная параметрами системы.

Перепишем (28) с учетом параметров системы:

$$\varphi(t) = B_1 e^{\frac{3(f_0 - f_{\min}) F b \alpha R^3}{2 V_{кр} J} t} \sin P_1 t + \omega_0 t + \frac{3(f_0 - f_{\min}) F b \alpha R^3 \omega_0}{c V_{кр}} - \frac{2f_0 - 3(f_0 - f_{\min}) V_{\Pi} F b \alpha R^3}{c V_{кр}}. \quad (34)$$

В приведенных выражениях (33), (34) B_1 – постоянная интегрирования определенная из условия $\varphi(0) = \omega_0$, то есть:

$$B_1 = \frac{\omega_0}{P_1} = \frac{\omega_0}{\sqrt{\frac{c}{J} \left[\frac{3(f_0 - f_{\min}) F b \alpha R^3}{2 V_{кр} J} \right]^2}}, \quad (35)$$

где $P_1 = \sqrt{\gamma_2 - \frac{\gamma_1^2}{4}} = \sqrt{\frac{c}{J} \left[\frac{3(f_0 - f_{\min}) F b \alpha R^3}{2 V_{кр} J} \right]^2}$ – соб-

ственная частота колебаний привода прокатного устройства волочительной машины. Таким образом, в приближенных решениях каждого уравнения системы (16) содержится гармоническая составляющая, амплитуды которой нарастают по экспоненциальному закону из-за наличия в характеристике трения отрицательного демпфирования.

Следовательно, мы построим качественное решение системы в предположении, что рассматриваемые уравнения являются независимыми. Дальнейшее уточнение решения системы в форме (12), (13) получим, если свяжем первое и второе уравнения системы через характеристику трения, а именно подставим в характеристику трения (13) в место $\dot{\varphi}(t)$ и $\dot{x}(t)$ первые производные выражений (25), (33). Такое решение будет более громоздким, но при этом движения инструмента и заготовки будут связанными.

Отметим, что если перед нами будет поставлена задача снижения динамических нагрузок в приводе, то рассмотренную систему следует дополнить еще одним дифференциальным урав-

нением движения ротора электродвигателя, обладающего неидеальной механической характеристикой.

При таком подходе решение системы (12), (13) будет выполнено по методу последовательных приближений. Если выполнить такую подстановку, то получим более точные условия самовозбуждения колебаний на контакте «инструмент – заготовка».

Также при исследовании процесса автоколебаний в зоне взаимодействия инструмента и заготовки важным является вопрос об устойчивости колебательного процесса. Другими словами, если в системе возникли устойчивые колебательные процессы с установившимися амплитудами, то в системе необходимо указать условия возникновения и поддержания такого процесса.

Когда в системе возникают периодические колебания с возрастающими амплитудами, то такой колебательный процесс будет неустойчивым, и при решении практических задач таких режимов по возможности необходимо избегать. Если же в системе параметры подобраны так, что автоколебания не возникают, то такие режимы должны быть рекомендованы к эксплуатации в действующих прокатных машинах.

Проведенные исследования позволили установить, что в приводах и исполнительных механизмах машин для обработки металлических изделий (и полуфабрикатов) методами пластического деформирования, при определенных режимах эксплуатации в ряде случаев возникают условия для развития автоколебательных и волновых процессов. Эти режимы оказывают неблагоприятное воздействие на качество получаемых изделий, а также на надежность и долговечность основных деталей и узлов технологических машин для процессов обкатки, волочения и холодной прокатки заготовок и изделий для точного машиностроения.

Приведенные нами решения системы уравнений (12) выполнены в линейной постановке, поэтому в полученных результатах присутствуют нарастающие автоколебательные процессы, изменяющиеся с собственной частотой колебаний системы. Если же при решении системы уравнений используют характеристику трения в виде (13), то, значит, необходимо учесть слагаемые, пропорциональные кубу скорости скольжения. В этом случае с увеличением скорости скольжения V процесс нарастания автоколебаний ослабляется, и возбуждение автоколебаний может прекратиться. Учитывая такие особенности в решении системы уравнений (12), получаем, что решение второго уравнения системы в установившемся режиме содержит как постоянную, так и гармоническую составляющую с возрастающими амплитудами.

Подставляя решение (25) в правую часть второго уравнения системы, получим, что внешняя нагрузка на заготовку состоит из постоянной составляющей и переменной составляющей с возрастающими амплитудами и частотой, равной собственной частоте колебаний системы.

Учитывая тот факт, что принятая схематизация заготовки в виде сосредоточенной массы m на упругой «пружине» с жесткостью EF является упрощенной, в дальнейшем используем более сложную расчетную схему, при этом нагрузка на заготовку будет включать как постоянную, так и гармонические слагаемые.

Обратимся к выводам по улучшению качества обрабатываемых изделий. Полученные результаты позволяют дать рекомендации по улучшению качества готовых изделий и снижению динамических характеристик машин по обработке металлов давлением.

Установлено, что высокое качество готовых изделий зависит как от степени уплотнения (наклепа поверхностных слоев заготовки), так и толщины уплотненного накатанного слоя. Показано, что толщина уплотненного слоя пропорциональна корню квадратному из отношения вертикальной нагрузки на заготовку к пределу текучести внутренних слоев материала заготовки.

Также установлено, что качество готового изделия существенно зависит от скорости проскальзывания формообразующего инструмента по заготовке. По исследуемой характеристике трения между инструментом и заготовкой определены пределы изменения скорости проскальзывания, при которых возникает автоколебания в системе «заготовка – формообразующий инструмент» (вращающийся ролик, вращающаяся цилиндрическая волока или неподвижная волока). Эти автоколебания являются опасными с точки зрения возникновения остаточных волнообразных деформаций на обрабатываемых поверхностях заготовок и деталей, которые обычно повышают степень шероховатости обрабатываемых деталей. Для улучшения качества получаемых изделий на основании проведенных исследований найдены соотношения между вертикальной нагрузкой, усилием и скоростью протягивания, при которых получается оптимальная шероховатость обрабатываемых изделий.

Результаты работы позволяют дать конкретные рекомендации по снижению динамических нагрузок (коэффициента динамичности k_d) в силовых механизмах машин по обработке изделий методами пластического деформирования. Эта задача может быть успешно решена путем рационального выбора характеристики муфты (или приводного вала) $c = c(\Delta\varphi)$ как функции угла закручивания муфты (или приводного вала).

Эффективным является прием, позволяющий реализовать «мягкую» характеристику муфты за счет установки ее упругих элементов с «натягом». Муфта автоматически блокируется до тех пор, пока $M_{упр}$ (момент сил упругости муфты) не достигнет своего номинального значения M_0 . Если $M_{упр} > M_0$, то муфта за счет «мягкости» характеристики начинают сглаживать пиковые нагрузки. При этом коэффициент динамичности в приводе может быть существенно снижен от значений $k_d = 2,5 \div 31$ и более до значений $1,25 \leq k_d \leq 1,5$.

Библиографический список / References

1. Ткачев В. Н. Методы повышения долговечности деталей машин / В. Н. Ткачев и др. – М.: Машиностроение, 1971. – 272 с.
2. Tkachev V. N. *Metody povysheniya dolgozhechnosti detaley mashin*. Moscow, Mashinostroyeniye, 1971, 272 p.
3. Смирнов В. В. Механика приводов прокатных станов / В. В. Смирнов, Р. А. Яковлев. – М.: Металлургия, 1977. – 219 с.
4. Smirnov V. V., Yakovlev R. A. *Mekhanika privodov prokatnykh stanov*. Moscow, Metallurgiya, 1977, 219 p.
5. Вибрации в технике. Справочник: в 6 т. Т. 1 / под ред. В. Н. Челомея. – М.: Машиностроение, 1978. – 352 с.
6. Chelomey V. N. (ed.). *Vibratsii v tekhnike. Spravochnik*. Vol. 1. Moscow, Mashinostroyeniye, 1978, 352 p.
7. Кононенко В. О. Колебательные системы с ограниченным возбуждением / В. О. Кононенко. – М.: Наука, 1964, 245 с.
8. Kononenko V. O. *Kolebatel'nye sistemy s ogranichenym vozbuзhdeniem*. Moscow, Nauka, 1964, 245 p.
9. Пановко Я. Г. Основы прикладной теории колебаний и удара / Я. Г. Пановко. – Л.: Политехника, 1990. – 272 с.
10. Panovko Ya. G. *Osnovy prikladnoy teorii kolebaniy i udara*. Leningrad, Politehnika, 1990, 272 p.
11. Вибрации в технике. Справочник: в 6 т. Т. 2 / под ред. В. Н. Челомея. – М.: Машиностроение, 1978. – 352 с.
12. Chelomey V. N. (ed.). *Vibratsii v tekhnike. Spravochnik*. Vol. 2. Moscow, Mashinostroyeniye, 1978, 352 p.

Мета. Аналіз поверхнево-зміцнюючої технології холодної обробки металів з урахуванням деформаційно-хвильових процесів, що виникають у ділянці перед формотворчим інструментом.

Методика досліджень. Для встановлення причин отримання готових виробів з підвищеною шорсткістю, недостатньою контактною міцністю, тріщинуватістю і лущенням поверхневих шарів, а також виникнення значних динамічних навантажень у механізмах машин для обробки деталей методами пластичного деформування, використана двомасова розрахункова модель, в якій робочий інструмент пов'язаний силами тертя з рухомою оброблюваною заготовкою.

Результати. Представлені результати з визначення умов виникнення автоколивань у системі «оброблювана заготовка – інструмент». На підставі аналізу характеристики тертя як функції від швидкості взаємного проковзування між оброблюваною заготовкою та формотворчим інструментом встановлений діапазон швидкостей ковзання, за яких можливе порушення автоколивальних процесів для фрикційної пари «інструмент – оброблювана заготовка».

Наукова новизна полягає в тому, що встановлено вплив змінної сили тертя на виникнення незатухаючих автоколивань між оброблюваною заготовкою та інструментом у машинах для «холодного» пластичного деформування металу. Знайдено умови виникнення і відсутності автоколивань у зоні контакту інструмента і заготовки.

Практична значущість полягає в тому, що виявлені режими експлуатації машин для обробки виробів методом пластичного деформування, за яких можуть виникнути нерегламентована шорсткість, тріщинуватість і «лущення» оброблюваних деталей, а також високий динамічний фон при роботі формотворчого інструмента приводних і силових механізмів. Наведено практичні рекомендації щодо поліпшення експлуатаційних якостей готових виробів і зниження віброактивності в приводі.

Ключові слова: обкатка, волочіння, накатка, пластична деформація, пружна хвиля деформації, ролик, інструмент, заготовка.

Purpose. Analysis of surface-hardening technology for cold processing of metals, taking into account the deformation-wave processes occurring in the area in front of the shaping tool.

Methodology. To establish the reasons for obtaining finished products with increased roughness, insufficient contact strength, fracturing and peeling of the surface layers, as well as the occurrence of significant dynamic loads in the mechanisms of machines for machining parts using plastic deformation, a two-mass design model is used in which the working tool is connected by friction with the moving processed workpiece.

Findings. The results of determining the conditions for the occurrence of self-oscillations in the system “workpiece - tool” are presented. Based on the analysis of the friction characteristics as a function of the mutual slip rate between the workpiece and the shaping tool, the range of slip speeds is set, at which the self-oscillating processes for the friction pair can be excited: “tool - workpiece”.

Originality consists in the fact that the influence of the variable friction force on the occurrence of sustained self-oscillations between the workpiece being processed and the tool in the machines for “cold” plastic deformation of the metal has been established. The conditions for the occurrence and absence of self-oscillations in the zone of contact between the tool and the workpiece are found.

Practical value lies in the fact that the modes of operation of machines for processing products by plastic deformation have been revealed under which unregulated roughness, fracturing and “peeling” of the parts being machined can occur, as well as a high dynamic background during the operation of the shaping tool of driving and power mechanisms. Practical recommendations are given to improve the performance of finished products and reduce vibroactivity in the drive.

Key words: running in, dragging, knurling, plastic deformation, elastic deformation wave, roller, tool, blank.

Рекомендована к публикации

к. т. н. Н. В. Сусл

Поступила 15.03.2019