

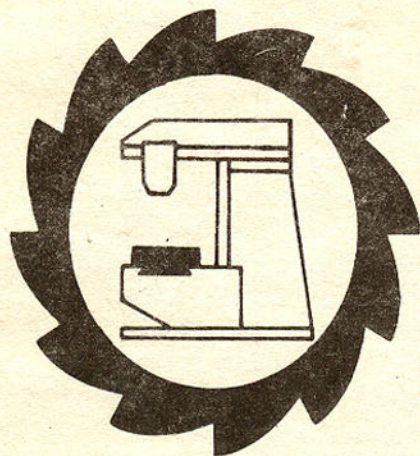


ДОНЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ

СБОРНИК НАУЧНЫХ СТАТЕЙ

ВЫПУСК 2



Донецк — 1995

ДОНЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ
МАШИНОСТРОЕНИЯ

Сборник научных
статей

ВЫПУСК 2

Донецк — 1995

Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Сб. научн. статей. - Донецк: Дон ГТУ, 1995. Вып. 2. - 100 с.

Сборник научных статей посвящен 75-ти летнему юбилею основания Донецкого государственного технического университета. В сборнике помещены статьи молодых и ведущих ученых, специализирующихся в области машиностроения. Рассмотрены проблемы создания новых технологий, оснастки, инструментов и высокоэффективного оборудования. Представлены некоторые вопросы повышения качества изделий прогрессивными методами.

Предназначен для научно-технических работников, ИТР и специалистов в области машиностроения.

Редакционная коллегия:

А.Н. Михайлов (председатель), В.В. Гусев, Л.П. Калафатова, И.А. Малышко, П.Г. Матюха, Б.М. Мизин.

Адрес редакционной коллегии:

340000, г. Донецк, ул. Артема, 58, Дон ГТУ, кафедра МСтанки

© Донецкий государственный
технический университет, 1995

75-ти летию

ДОНЕЦКОГО

ГОСУДАРСТВЕННОГО

ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

(1921-1996)

ПОСВЯЩАЕТСЯ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ С НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ВКЛАДЫШАМИ ПРИ СМЕШАННОМ ТРЕНИИ

Горкуша А.Е., Молчанов А.Д.

Подшипники скольжения с неметаллическими вкладышами, которые работают в условиях смешанного и граничного трения, находят широкое применение в опорах многих машин и, в частности, в горных машинах. Однако работа таких подшипников изучена еще недостаточно потому, что во многих литературных источниках по подшипникам скольжения исследуется их работа в гидродинамическом режиме.

Несущая способность подшипников скольжения в режиме смешанного трения оценивается по показаниям контактного давления на скорость скольжения - параметр "pv". В этой работе критерием оценки несущей способности принята температура, потому что она результирующий показатель влияния давления, скорости скольжения и материала подшипника. Для полимерных вкладышей допустимое значение параметра "pv" определяется из соотношения [1]

$$[T] = \frac{fdl[pv]}{K_{t0}}$$

где K_{t0} - параметр теплоотвода узла трения;

d, l - диаметр и длина подшипника;

$[T]$ - предельно допустимая температура на рабочей поверхности вкладыша подшипника;

f - коэффициент трения.

Результаты того, что для заданных условий испытаний величина fdl/K_{t0} - постоянна, то температура в зоне трения однозначно определяется и параметр "pv". Предельные значения температуры для полимерных материалов, которые используются в подшипниках скольжения, приводятся в справочниках, например [1, 2 и др.]. Выбор температуры, как критерия работоспособности полимерных подшипников объясняется тем, что с повышением температуры на поверхности трения термореактивные материалы обугливаются, а термопластичные оплавляются и текут.

Другим параметром для оценки работы подшипников принят мо-

мент сопротивления вращению (момент трения). По моменту трения и нагрузке для каждого конкретного случая определяется коэффициент трения, как показатель для сравнения материалов, которые испытываются.

Испытания подшипников скольжения проводились на специально сконструированной и изготовленной машине трения. Величина нагрузки и момент трения измерялись тензометрическими датчиками с усилением сигналов тензодатчиком ВАИЧ и регистрировались на осциллографе НИИ5. Температура в зоне трения измерялась микротермопарами группы М-К (медь-константан), которые обеспечивают линейность характеристики в исследуемом диапазоне и величину сигнала, достаточную для записи на осциллографе без усилений. Для смазки использовался солидол синтетический УС чистый и с абразивными добавками.

Статистическая обработка данных показала, что среднеквадратичная ошибка измерений температуры (S_t) - $1,78^\circ\text{C}$, а момента трения (S_m) - 2 Нсм.

Для испытаний была выбрана модель опоры ролика ленточного конвейера с подшипником скольжения. Вкладыши подшипников изготовлялись из капролона В, масляниста и железобетита с соотношением длины к диаметру $l/d=1,25$.

Испытания показали, что для полимерных подшипников (рис. 1 а, б) момент трения при работе без смазки и со смазкой с абразивом изменяется практически одинаково, а значение момента трения всегда больше, чем при работе с чистой смазкой. С ростом нагруженной разницы значений момента трения увеличивается. Это объясняется тем, что при смазывании пластичной смазкой гидродинамические пары в подшипниках для принятой скорости скольжения не образуются. Увеличение коэффициента трения при наличии абразива перекрывает благоприятное действие смазки. Большой разницы в значениях момента трения у подшипников из капролона и масляниста не наблюдается при всех видах смазывания. Исходя из этого, выбор того или иного материала, которые исследовались, необходимо обосновать его начальной стоимостью.

Для подшипников из железобетита (рис. 1 в) наблюдается другая зависимость. Здесь величина момента трения при смазывании чистой смазкой и смазкой с абразивом практически не отличается при всех нагрузках, а момент трения без смазки - величина

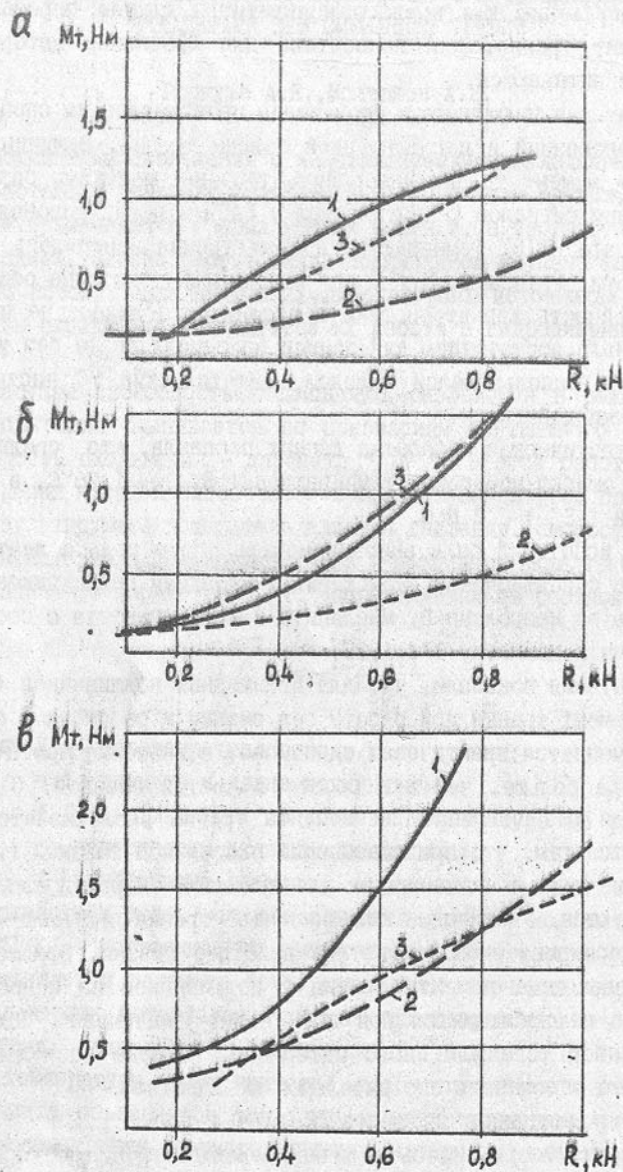


Рис.1. Зависимость момента трения от нагрузки
Условия смазывания: 1 - без смазки; 2 - чистая смазка;
3 - смазка с абразивом. Материалы: а - капролон;
б - маслянит; в - железуграфит

Такая зависимость может быть объяснена тем, что твердость железуграфита больше твердости абразивных добавлений, где применялся угольный и породный штиб с максимальным размером зерна 0,2...0,3 мм. В начале работы идет процесс приработки, и мягкие абразивные частички перемелются в пыль, тем самым увеличивая вязкость (плотность) смазки, не вызывая большого роста момента трения.

Температура в зоне трения (рис.2, а, б) полимерных подшипников в зависимости от условий смазывания отличается незначительно при нагружении до 0,5 кН. С последующим увеличением нагружения наблюдается уменьшение температуры при смазывании чистой смазкой. Особенно это заметно у маслянита.

Для подшипников из железуграфита при наличии смазки с увеличением нагружения от 0,2 до 0,8 кН наблюдается увеличение температуры около 20°C , в то время как при трении без смазки температура увеличивается на 55°C (рис.2, в). Следует отметить, что для железуграфитовых подшипников температура в исследованиях с заданными нагружениями до 0,8 кН постоянна, при достижении определенного максимума стабилизируется. В полимерных подшипниках температура постоянна только для нагружений до 0,5 кН, а при дальнейшем росте нагружения температура при проведении эксперимента постоянно увеличивается. Объясняется это тем, что теплопровод в полимерных подшипниках значительно хуже из-за малой теплопроводности материала. Железуграфит имеет достаточно высокую теплопроводность, и отвод тепла лучший.

Коэффициент трения от нагружения рассчитывается по результатам средних серий экспериментов для заданного нагружения по формуле:

$$\tau = \frac{2M_{тр}}{Rd},$$

где $M_{тр}$ - величина среднего момента трения, Нсм;

R - нагружение на подшипник, кН;

d - внутренний диаметр втулки подшипника, см.

Для подшипников из маслянита и железуграфита (рис.3, а, в) при небольших нагружениях до 0,4 кН наблюдается некоторое уменьшение коэффициента трения. Это объясняется тем, что в начальный момент, при увеличении нагружения, повышается и темпера-

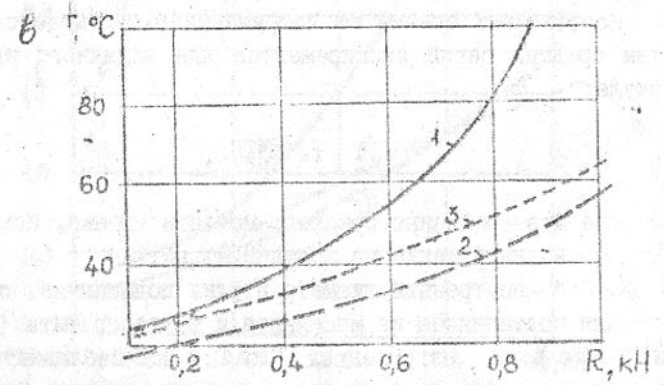
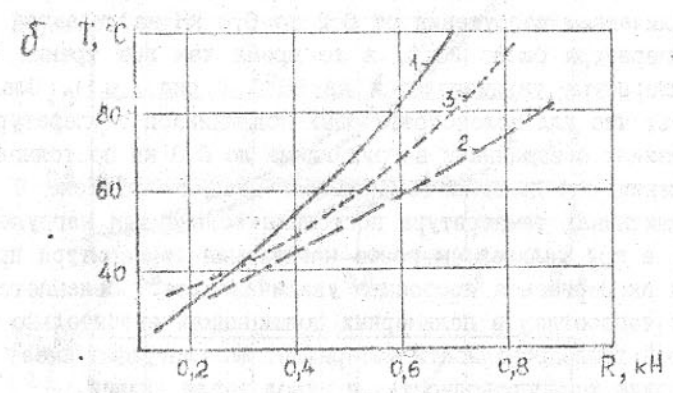
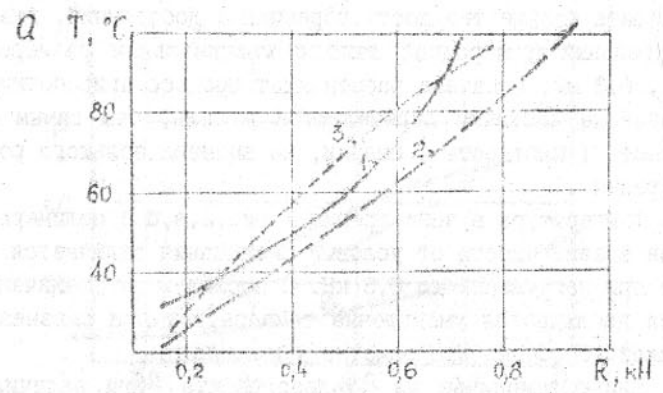


Рис.2. Зависимость температуры в зоне трения от нагрузки
Условие смазывания: 1 - без смазки; 2 - чистая смазка;
3 - смазка с абразивом. Материалы: а - капролон;
б - маслянист; в - железографит

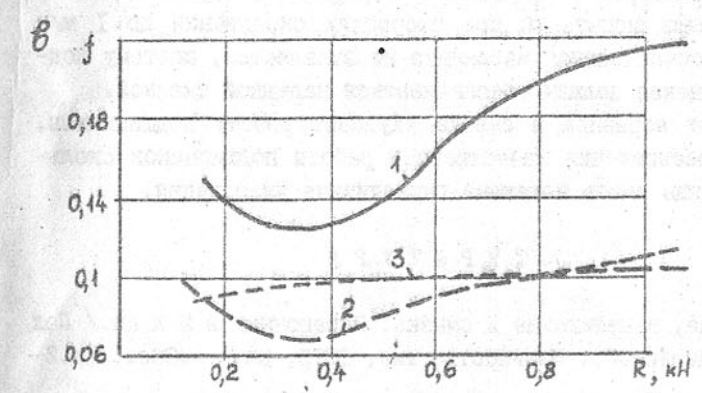
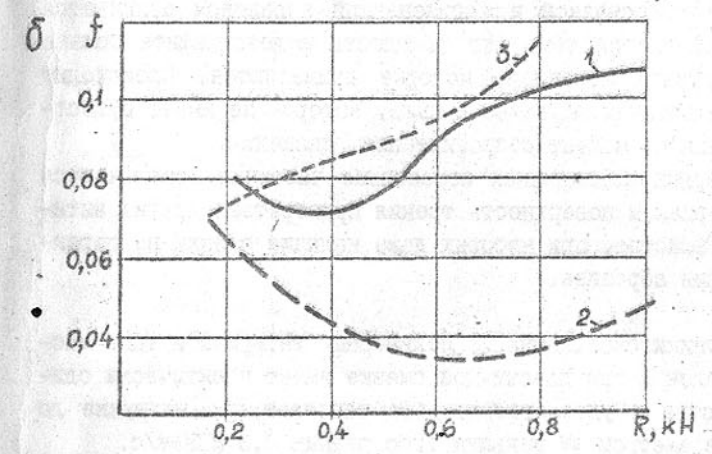
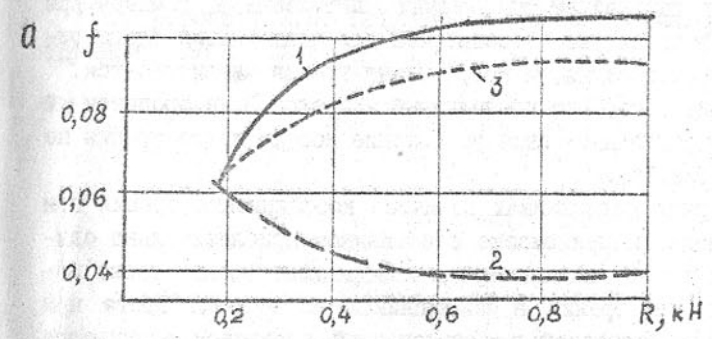


Рис.3. Зависимость коэффициента трения от нагрузки
Условие смазывания: 1 - без смазки; 2 - чистая смазка;
3 - смазка с абразивом. Материалы: а - капролон;
б - маслянист, в - железографит

тура, а это ведет к "выпариванию" смазки из пор указанных материалов. При дальнейшем увеличении нагружения и температуры запаса масла в порах уже недостаточен для поддержания благоприятных условий смазывания, и коэффициент трения увеличивается.

Вследствие того, что исследуемый капролон В не пропитанный смазкой, то определенное выше уменьшение коэффициента трения не наблюдается (рис.3а).

В полимерных подшипниках величина коэффициента трения при работе без смазки и при смазке с абразивом приблизительно одинакова, а при подаче чистой смазки коэффициент трения резко падает. Коэффициент трения в подшипниках из железного графита при смазывании чистой смазкой и загрязненной абразивом отличается мало. Это объясняется тем, что твердость железного графита больше твердости частичек абразива, которые применяются. Происходит размельчение частичек абразива в пыль, которое не имеет существенного влияния на момент сопротивления движению.

В полимерных подшипниках абразивные частички измельчаются в мягкий материал и поверхность трения приобретает другие антифрикционные свойства, при которых даже наличие смазки не прекращает действия абразива.

Выводы:

- подшипники скольжения из полимерных материалов типа маслянит и капролон В при пластичной смазке имеет практически одинаковые свойства и удовлетворительно работает при нагрузке до 0,35 МПа с параметром PV меньшим либо равным 0,3 МПа*м/с.

- в условиях испытаний при скоростях скольжения до 1 м/с свойство "самосмазывания" маслянита не выявляется, поэтому подшипники скольжения должны обеспечиваться надежной смазкой.

- наличие абразива в смазке ухудшает работу подшипников, поэтому для обеспечения качественной работы подшипников скольжения они должны иметь надежные герметичные уплотнения.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Трение, изнашивание и смазка: Справочник в 2-х кн./ Под ред. И.В.Крачельского.-Машиностроение, 1978, кн.1- 400с., кн.2- 358с.

2. Полимеры в узлах трения машин и приборов: Справочник / Е.В.Зиновьев, А.Л.Левин, А.В.Чичинадзе.- М.: Машиностроение,

1980.- 208с.

3. Воронков Б.Д. Подшипники сухого трения.- Л.: Машиностроение, 1979.- 224с.

ПОЛУЧЕНИЕ ЛИСТОВ С РЕГУЛИРУЕМОЙ ШЕРОХОВАТОСТЬЮ ДЛЯ ШТАМПОВКИ^{*)}

Е.В.Вайков, И.В.Клименко

В настоящее время в машиностроении широкое применение находят детали, изготовленные штамповкой из листового проката. Однако, на качество этих деталей существенное влияние оказывает шероховатость поверхности листов, предназначенных для штамповки [1, 2]. Подбором оптимального микрорельефа можно значительно уменьшить отходы металла и брак при последующей его штамповке. Существуют различные способы получения заданной шероховатости поверхности листового проката перед штамповкой: шлифование после прокатки и получение требуемой шероховатости в процессе прокатки. Первый способ связан с большими материальными затратами. Поэтому выгоднее получать требуемую шероховатость поверхности листов при прокатке. Для этого, например, осуществляют прокатку в валах различной шероховатости [1, 2]. Однако, это требует наличия достаточно большого парка валков с различной шероховатостью поверхности. Получение необходимого качества поверхности может быть обеспечено дроссировкой после прокатки [3]. Сотрудниками Краматорского индустриального института предложен [4] процесс деформации листового проката между неприводным и приводным валками для получения листов с односторонней полировкой. При этом необходима реконструкция главной линии стана.

Нами разработаны новые способы прокатки листов и полос путем рассогласования скоростей верхнего (V_B) и нижнего (V_H) валков, которые позволяют оперативно и целенаправленно управлять качеством их поверхности [5, 6]. Осуществление этих способов на реверсивных прокатных станах не требует дополнительных капитальных затрат. При создании рассогласования скоростей валков, превышающем обжатие листа в пропуске, происходит постоянное проскальзывание одного из валков по поверхности листа [5]. Это процесс прокатки с постоянной пробуксовкой валка (ППВ). Повышение качества проката происходит за счет шлифования поверхности листа проскальзывающим валком. При сообщении ведомому валку скорости, направленной противоположно скорости движения листа, происходит стабилизация пробуксовки валка и повышение качества поверхности листа путем шлифования [6]. Это процесс прокатки-шлифования (ПШ).

^{*)} Работа выполнена под руководством проф. В.С.Горелика

На лабораторном прокатном стане дуо 100 проведены экспериментальные исследования процессов ППВ и ПШ, заключающиеся в изучении влияния соотношения скоростей валков, шероховатости их поверхности и смазки на энергосиловые параметры процессов и качество поверхности готовых листов.

Методика исследования

1. Прокатывали алюминиевые образцы размером $h \times b \times l = 2,0 \times 30 \times 200$ мм с постоянным первоначальным межвалковым зазором в валах равного диаметра и различной шероховатости. Верхний валок имел шероховатость $Ra \approx 0,25$ мкм, а нижний - $Ra \approx 2,5$ мкм. Привод валков осуществляли как индивидуально (при $a = V_B/V_H \neq 1$), так и через шестеренную клетку (при $a = V_B/V_H = 1$).

2. Часть образцов, как при симметричном, так и при асимметричном процессах, была проката без смазки, а часть со смазкой. В качестве смазки использовали трансформаторное масло.

3. При исследовании процесса ППВ без смазки образцы прокатывали с соотношением скоростей валков $a = 1,14...2,71$, а со смазкой - с $a = 1,3...3,66$.

4. При исследовании процесса ПШ, для которого характерно протиговорачивание верхнего валка, образцы прокатывали без смазки с соотношением скоростей валков $a = (-0,47)...(-1,49)$, а со смазкой - с $a = (-0,48)...(-1,31)$.

5. В процессе исследований измеряли абсолютное обжатие Δh , силу прокатки P , момент прокатки на шпинделе верхнего M_B и нижнего M_H валков, скорость вращения двигателей верхнего n_B и нижнего n_H валков, шероховатость поверхности валков Ra_B и обеих поверхностей образцов Ra_0 до и после прокатки и рассчитывали мощность прокатки на верхнем N_B и нижнем N_H валках, а также относительное обжатие ε .

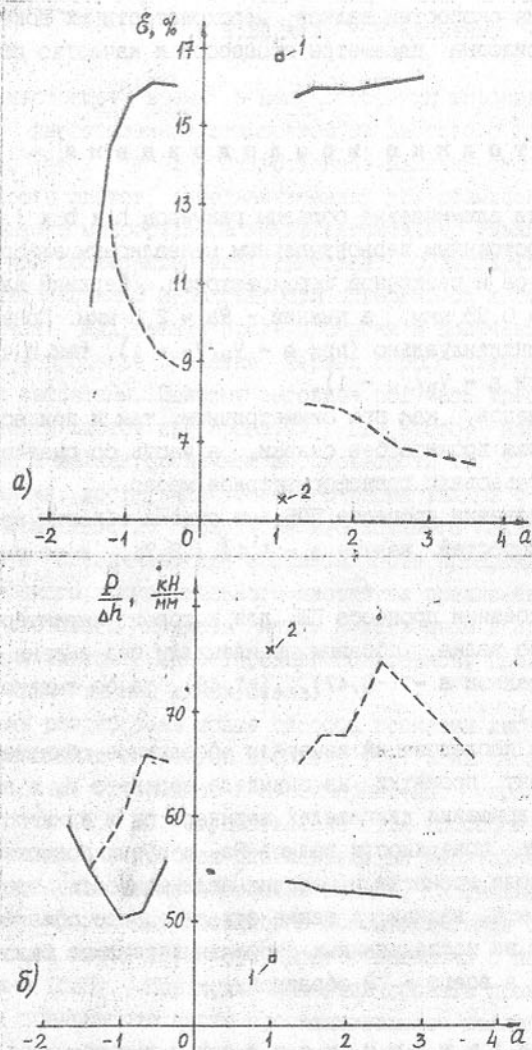
6. По каждому из исследованных скоростных режимов было прокатано по три образца, а всего - 78 образцов.

Результаты исследования

Относительное обжатие. Межвалковый зазор при всех скоростных режимах был одинаковый, однако, при изменении параметра a значение ε изменялось (рис. 1а).

Так при ППВ без смазки ε при различных значениях параметра a

Зависимость относительного обжатия (ϵ) и приведенной силы прокатки (δ) от соотношения скоростей валков



— прокатка без смазки; - - - - - прокатка со смазкой;
1, 2 - обжатие (приведенная сила прокатки) при прокатке через шестеренную клетку соответственно без смазки и со смазкой.

Рис. 1.

стабильно держится в диапазоне 16...17 %. Смазка с обеих сторон образца значительно снижает ϵ . Так при $a = 1$ ϵ составило 5,5 %, а при $a = 1,3$ $\epsilon = 8$ %. С дальнейшим увеличением параметра a наблюдали снижение ϵ .

При ПШ без смазки в диапазоне значений параметра a от $(-0,47)$ до $(-1,0)$ ϵ держится на уровне 16 %, однако, дальнейшее увеличение скорости верхнего вала значительно снижает ϵ (при $a = -1,48$ $\epsilon = 10,5$ %). ПШ со смазкой дает противоположную картину. При изменении параметра a от $-0,48$ до $-1,31$ относительное обжатие увеличивалось.

Изменение относительного обжатия объясняется, на наш взгляд, отклонением силы прокатки от вертикали при асимметричном процессе.

Сила прокатки. Так как изменение соотношения скоростей валков вызывает изменение относительного обжатия при постоянном межвалковом зазоре, то более правильно рассматривать изменение энергосиловых параметров прокатки, приведенных к абсолютному обжатию.

Эксперименты показали, что сила прокатки при ПШВ и ПШ без смазки больше, чем со смазкой. Это можно объяснить тем, что использование смазки значительно уменьшает обжатие образцов. На рис. 16 дана зависимость приведенной к единице обжатия силы прокатки ($P/\Delta h$), т.е. жесткость полосы, от соотношения скоростей валков: слева от оси абсцисс - процесс ПШ, справа - процесс ПШВ. Жесткость полосы при ПШВ со смазкой выше, чем при прокатке без смазки. Такая же картина наблюдалась и при прокатке через шестеренную клетку. В процессе ПШ с увеличением a жесткость полосы при прокатке без смазки всегда уменьшалась, а со смазкой - увеличивалась при $a < 2,4$ и уменьшалась при $a > 2,4$.

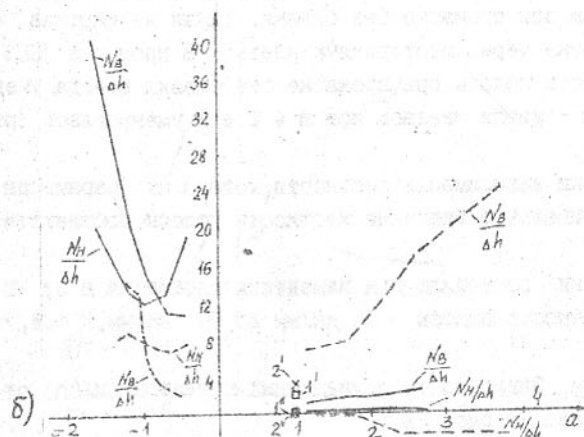
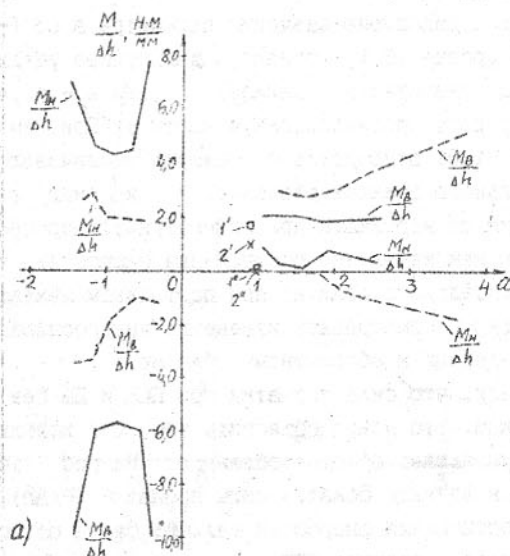
При ПШ без смазки зависимость жесткости полосы от параметра a имеет экстремум: минимальное значение жесткости полосы соответствует параметру $a \approx -1$.

Применение смазки позволило при изменении параметра a от $-0,48$ до $-1,31$ снизить жесткость полосы с 65 кН/мм до 56 кН/мм, т.е. на 13,8 %.

Моменты прокатки. Зависимость приведенных моментов ($M/\Delta h$) от величины параметра a дана на рис. 2а.

При приводе валков через шестеренную клетку ($a = 1$) соотношение моментов M_2/M_1 меньше единицы независимо от наличия смазки. Объясняется это тем, что нижний валок имел насеченную поверхность, а верхний - шлифованную, т.е. присутствовала асимметрия шероховатостей. С увеличением скорости верхнего вала (ПШВ) скоростная асимметрия пре-

Зависимость приведенных моментов прокатки (а) и приведенной мощности прокатки (б) от соотношения скоростей валков



— прокатка без смазки; --- прокатка со смазкой;
1', 1'' — $M_H/\Delta h$, $M_B/\Delta h$ ($N_H/\Delta h$, $N_B/\Delta h$) при прокатке через шестеренную клетку без смазки;
2', 2'' — $M_H/\Delta h$, $M_B/\Delta h$ ($N_H/\Delta h$, $N_B/\Delta h$) при прокатке через шестеренную клетку со смазкой.

Рис. 2.

залирует над асимметрией шероховатостей и соотношение моментов M_B/M_H становится больше единицы. С увеличением параметра α при прокатке без смазки величина моментов прокатки на обоих валках не изменилась. При ППВ со смазкой с увеличением параметра α соотношение M_B/M_H увеличилось, а при достижении $\alpha > 1,7$ имел место "генераторный" режим ($M_B/M_H < 0$).

Для ППВ без смазки характерно наличие наименьшей абсолютной величины приведенного момента на обоих валках. Это соответствует $\alpha \approx 1$. При ППВ со смазкой приведенные моменты на валках в диапазоне изменения параметра α от $-0,48$ до $-1,0$ изменяются незначительно. С увеличением скорости верхнего валка ($|a| > 1$) моменты также начинают увеличиваться. Отрицательные значения момента на верхнем валке объясняются не наличием "генераторного" режима, а направлением вращения верхнего валка.

Мощность прокатки. Мощность прокатки на каждом валке для всего диапазона исследованных значений параметра α приведена на рис. 2б. При ППВ без смазки с увеличением параметра α наблюдалось некоторое увеличение мощности прокатки на более скоростном верхнем валке, в то время, как на нижнем валке она осталась постоянной. Применение смазки вызвало более интенсивное нарастание мощности на верхнем валке и снижение мощности на нижнем валке. По сравнению с мощностью при прокатке через шестеренную клетку мощность ППВ как со смазкой, так и без нее увеличилась.

При ППВ без смазки минимальная мощность на нижнем валке наблюдалась при $\alpha \approx -1$, а мощность на верхнем валке с изменением параметра α от $-0,48$ до $-1,31$ резко увеличивалась. Применение смазки и изменение параметра α в пределах от $-0,48$ до $-1,31$ вызвало рост мощности на верхнем валке. На нижнем валке мощность в диапазоне параметра $\alpha = -0,48 \dots -1,0$ постоянна, а в диапазоне параметра $\alpha = -1,0 \dots -1,31$ увеличивается. Общая же мощность прокатки при ППВ была значительно ниже со смазкой, чем без нее.

Качество поверхности листов. Так как при проведении исследований исходная шероховатость валков и образцов была постоянной, то изменение качества поверхности оценивали по коэффициенту отпечатываемости. Род коэффициентом отпечатываемости понимается отношение шероховатости поверхности прокатываемого образца (R_{a0}) к шероховатости поверхности валка, с которой контактировал образец (R_{aB}). На рис. 3 приведены зависимости коэффициентов отпечатываемости для стороны образца, контактировавшей с верхним валком.

Зависимость коэффициента отпечатаемости со стороны верхнего вала от соотношения скоростей валков

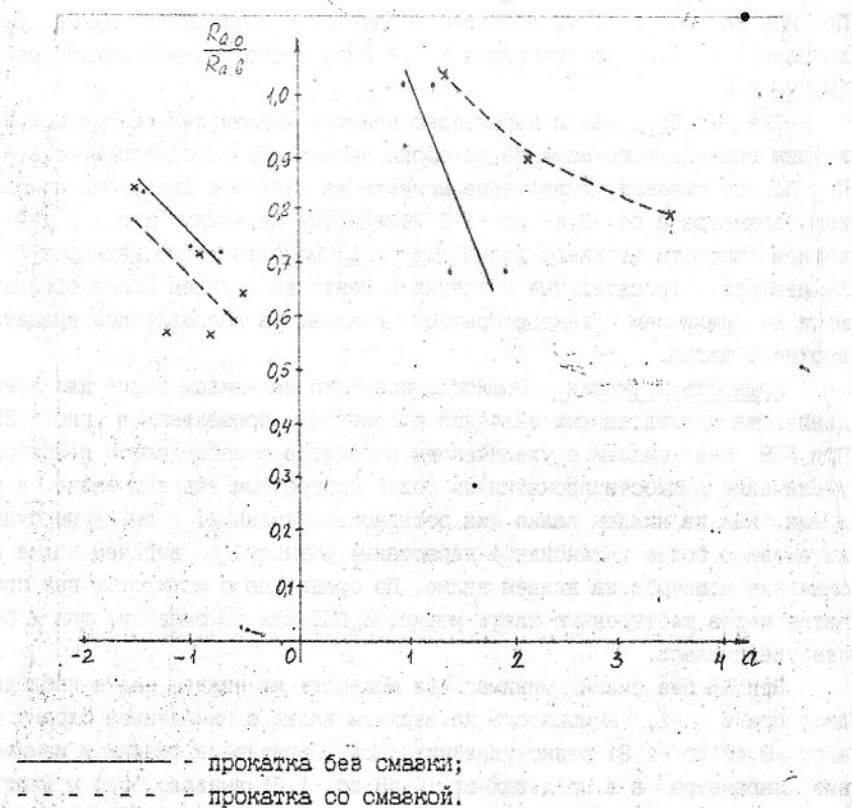


Рис. 7.

Во всех случаях процессов ППВ наблюдалось уменьшение шероховатости верхней поверхности образцов с увеличением скорости верхнего вала, причем при отсутствии смазки эффект проявился более ярко. Так, с увеличением параметра a до ~ 2 при прокатке без смазки коэффициент отпечатаемости уменьшился от 1,0 до 0,69, а со смазкой — от 1,0 до 0,9.

Осуществление процесса ПШ позволило, по сравнению с процессом ППВ, сильнее снизить коэффициент отпечатаемости. В диапазоне параметра a $-1,31 < a < -0,48$ и подаче смазки коэффициент отпечатаемости снизился с 0,78 до 0,6. Аналогичная картина наблюдалась и без смазки, однако, значения коэффициента отпечатаемости были несколько выше.

ВЫВОДЫ

1. Процесс прокатки с пробуксовкой одного из валков за счет шлифования поверхности листа буксующим валком позволяет в зависимости от соотношения скоростей валков регулировать конечную шероховатость листа.

2. Процесс прокатки в валках, один из которых имеет окружную скорость, направленную противоположно скорости движения листа, стабилизирует пробуксовку и позволяет получить холоднокатаные листы с глянцевой поверхностью.

3. Энергосиловые параметры процессов ППВ и ПШ позволяют реализовать их на действующих станах с индивидуальным приводом валков.

4. Разработанные технологии позволяют получать листовой прокат, обеспечивающий высокое качество изготавливаемых штамповкой деталей в машиностроении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мазур В.Л. Производство листа с высококачественной поверхностью. — К.: Техника, 1982. — 166 с.
2. Мелешко В.И., Качайлов А.П., Мазур В.Л. Прогрессивные методы прокатки и отделки листовой стали. — М.: Металлургия, 1980. — 192 с.
3. Прокатка автолистовой стали в валках с разной шероховатостью /В.А.Николаев, В.М.Цедьвадьников, В.С.Мовшович и др. //Черная металлургия. Бюллетень НТИ. — 1977. — Вып. 23. — С. 47...48.

4. Потапкин В.Ф., Федоринов В.А., Сатонин А.В. Деформация тонких полос между неприводным и приводным вальками // Цветные металлы. - 1982. - № 10. - С. 71...73.

5. А.С. 1400676 СССР, МКИ^Б В 21 В 1/22. Способ прокатки листов и полос / В.С.Горелик, А.П.Мит'ев, Е.Е.Вайков, И.В.Клименко, А.В.Феофилактов. - 4 с.

6. А.С. 1490777 СССР, МКИ^Б В 21 В 1/22. Способ прокатки листов и полос / В.С.Горелик, А.П.Мит'ев, Е.Е.Вайков, И.В.Клименко, А.В.Феофилактов. - 5 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ФОРМИРОВАНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КРУГА ПРИ ШЛИФОВАНИИ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ АЛМАЗНЫМИ КРУГАМИ

Матюха П.Г., Изотов В.Ю.

При шлифовании с управлением параметрами рабочей поверхности круга (РПК) ряд таких технологических показателей обработки, как качество шлифованной поверхности, точность обработки могут быть стабилизированы во времени за счет выбора режимов управляющих воздействий. При обычном шлифовании изменение этих показателей во времени обусловлено ростом сил резания, величина которых в результате изменения параметров РПК, в определенный момент времени достигает критического значения, превышающего допустимые пределы. В силу изложенного, определение времени формирования критических параметров РПК, обуславливающих критическое значение сил резания, приобретает одно из первостепенных значений, так как позволяет определить необходимое время обновления РПК, а, соответственно, и режимы управляющих воздействий.

Величина тангенциальной составляющей силы резания с учетом влияния времени и условий шлифования может быть рассчитана по формуле

$$P_z = \frac{\left[\frac{\sqrt{1 + M^2} a_z(\tau) \cos \omega}{\sin \beta} + K_3 M \mu_{13}(\tau) \right] Z_p(\tau) b(\tau) q}{1 + \left[\frac{\sqrt{1 + M^2} a_z(\tau) \cos \omega}{\sin \beta} + K_3 M \mu_{13}(\tau) \right] Z_p(\tau) b(\tau) \frac{4 \alpha \alpha_0 v_k \sqrt{H}}{\lambda v_d S \sqrt{\pi}}}, \quad (I)$$

где C, α - параметры уравнения регрессии, описывающего влияние температурно-скоростных факторов на допускаемые касательные напряжения в условной плоскости сдвига;

α - коэффициент температуропроводности, м²/с;

λ - коэффициент теплопроводности, Вт/м⁰К;

- v_k - скорость круга, м/с;
 v_d - скорость детали, м/мин;
 S - площадь зоны контакта детали со шлифовальным кругом, мм²;
 H - безразмерная полуширина источника тепла;
 $a_z(\tau)$ - максимальная толщина запытообразного среза, мкм;
 μ - коэффициент трения алмазного зерна в условиях резания;
 $l_z(\tau)$ - величина контактной площадки алмазного зерна, мкм;
 $z_p(\tau)$ - количество одновременно контактирующих зерен;
 $b(\tau)$ - ширина единичного среза, мм;
 β - угол сдвига;
 ω - угол действия;
 K_z - коэффициент, учитывающий закон распределения нормальных напряжений на поверхности контакта зерна с деталью;
 M - коэффициент, определяемый по формуле

$$M = 1 + 2 \left[\frac{\pi}{4} - \beta \right].$$

Таким образом, для расчета составляющей P_z по формуле (1) необходимо знать закономерности изменения во времени количества одновременно контактирующих зерен, величины контактной площадки на их задней поверхности и размеров поперечного сечения единичных срезов.

Количество одновременно контактирующих зерен в интересующий нас момент времени

$$Z_p = \frac{B_k L K_k}{S_{\text{ан}}} F(t_\Phi, \tau), \quad (2)$$

- где B_k - ширина шлифовального круга, мм;
 L - длина дуги контакта детали со шлифовальным кругом, мм;
 $S_{\text{ан}}$ - расстояние между зернами на РПК, мм;
 $F(t_\Phi, \tau)$ - функция распределения разновысотности зерен;
 K_k - коэффициент контактирования, учитывающий влияние эффекта перекрытия единичных срезов на Z_p .

Значение коэффициента контактирования, рассчитанного по специальной методике [1] для условий шлифования стали ГСМБТЗ кругом АС6 160/125-4-М1, приведен в табл. I.

Таблица I

Влияние скорости обрабатываемой детали v_d и глубины шлифования t_Φ на величину коэффициента контактирования

Режимы шлифования		Коэффициент контактирования, K_k
Скорость детали v_d , м/с	Глубина шлифования t_Φ , мкм	
0,1	5	1,0
	10	0,64
	20	0,32
	30	0,19
0,15	5	1,0
	10	0,67
	20	0,34
	30	0,21
0,2	5	1,0
	10	0,73
	20	0,38
	30	0,24

После электроэрозионной правки и алмазного шлифования стали и твердых сплавов разновысотность зерен описывается законом Вейбулла [2], функция распределения которого имеет вид

$$F(t_\Phi) = 1 - \exp \left[- \frac{t_\Phi^m}{x_0} \right], \quad (3)$$

где t_Φ - глубина шлифования, мкм;
 m, x_0 - параметры распределения.

С увеличением времени шлифования параметры распределения разновысотности изменяются, вызывая изменение количества одновременно контактирующих зерен.

Определим значение $F(t_{\Phi})$ в функции времени, приняв за основную параметры распределения разноразмерности зерен, сформированные в процессе электроэрозионной правки (табл.2), с помощью коэффициента k_{τ} , отражающего влияние времени шлифования на значение функции распределения разноразмерности. Тогда

$$F(t_{\Phi}, \tau) = \left[1 - \exp \left[- \frac{t_{\Phi}^m}{x_0} \right] \right] k_{\tau}, \quad (4)$$

где m, x_0 - параметры распределения Вейбулла, описывающего разноразмерность зерен на рельефе, сформированном в процессе электроэрозионной правки.

Таблица 2

Параметры закона Вейбулла, описывающего распределение разноразмерности алмазных зерен после электроэрозионной правки

Шлифовальный круг	Параметры распределения Вейбулла	
	m	x_0
АС6 100/80-4-М1	2,23	2946
АС6 160/125-4-М1	2,03	2820
АС6 250/200-4-М1	1,70	710

Коэффициент k_{τ} представим, воспользовавшись экспериментальными данными о распределении зерен после правки, 15, 30, 45 минут алмазного шлифования, в виде зависимости

$$k_{\tau} = A_1 \tau^{q_1}, \quad \tau > 0, \quad (5)$$

где τ - время шлифования, мин;

A_1, q_1 - эмпирические коэффициенты.

Значения A_1, q_1 при алмазном шлифовании Х12Ф4М приведены в табл.3.

Изменение величины контактных площадок на задней поверхности зерен с увеличением времени шлифования для алмазных кругов зернистости АС6 100/80, 160/125, 250/200 может быть описан обобщенной зависимостью, полученной в результате обработки данных по влиянию зернистости алмазов на величину контактной площадки [3],

в абсолютных величинах

$$l_{\Sigma}(\tau) = 0.22 d \tau^{0.047} \quad (6)$$

где τ - время шлифования, мин;

d - размер шаровой модели зерна, мкм.

Таблица 3

Влияние глубины шлифования и зернистости алмазных кругов на значение A_1 и q_1 при обработке Х12Ф4М

Шлифовальный круг	Глубина шлифования t_{Φ} , мм	Значение эмпирических коэффициентов	
		A_1	q_1
АС6 100/80-4-М1	0,010	0,96	0,484
	0,015	1,05	0,336
	0,020	0,98	0,278
АС6 160/125-4-М1	0,010	0,84	0,517
	0,015	0,87	0,432
	0,020	0,89	0,364
АС6 250/200-4-М1	0,010	1,02	0,432
	0,015	1,01	0,354
	0,020	1,00	0,296

Размеры поперечного сечения единичного среза - толщину a_{zmax} и ширину b рассчитывали по формулам, приведенным в работах [2,4], при этом толщина среза a_z оценивалась фактической толщиной, учитывающей наличие неровностей на поверхности резания

$$a_z = a_{zmax} + \frac{R_{max}}{2}, \quad (7)$$

где a_{zmax} - максимальная толщина запытообразного среза, образованная двумя последовательно расположенными равновысокими зернами;

R_{max} - максимальная высота неровностей, сформированная на поверхности резания.

Для расчета составляющей силы резания по формуле (1) была

составлена программа на ЭВМ, реализуя которую пошаговым методом можно найти время формирования критических параметров РПК по критической величине тангенциальной составляющей силы резания P_z . Расчет прекращался при условии

$$P_{zкр} > P_z \geq 0,9P_{zкр} \quad (8)$$

где $P_{zкр}$ - критическое значение величины тангенциальной составляющей силы резания, Н.

Величину $P_{zкр}$ определим по критической температуре в зоне резания из условия отсутствия фазово-структурных изменений в поверхностном слое детали (точка A_1 /5,6/)

$$P_{zкр} = \frac{T_{кр} \lambda \nu_D \sqrt{\pi}}{4 \alpha \sqrt{H}} \quad (9)$$

где $T_{кр}$ - температура начала фазово-структурных превращений в поверхностном слое детали, °К.

Чтобы исключить изменение фазово-структурного состояния обрабатываемой поверхности, время обновления РПК должно быть равно времени формирования критических параметров поверхности круга /7/, используя которое рассчитываются интенсивность удаления связи и электрические режимы управляющих воздействий на РПК.

Таким образом, использование разработанной методики определения времени формирования критических параметров РПК, позволяет определить оптимальный период времени обновления рабочей поверхности алмазного шлифовального круга в результате управляющих воздействий и обеспечить квазистационарное состояние выходных параметров процесса шлифования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Расчет числа зерен, участвующих в процессе шлифования /Шевелева Г.И., Матюха П.Г., Терехова Л.К. // Резание и инструмент. 1988. Вып. 40. С.7-14.

2. Матюха П.Г. Теоретические и экспериментальные исследования кинематики процесса и рельефа круга при алмазно-искровом шлифовании. / Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - М., 1980. -

16 с.

3. Матюха П.Г., Изотов В.Ю. Влияние времени шлифования на величину площадок контакта на задней поверхности алмазных зерен. // Новые технологии и системы обработки в машиностроении. Тезисы докладов научно-технической конференции. - Донецк. 1994. - С.81-82.

4. Матюха П.Г., Терехова Л.К. Исследование высоты неровностей профиля поверхности резания при шлифовании // Резание и инструмент. 1990. Вып. 44. С.114-121.

5. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин и др. Под общ. ред. В.Г. Сорокина. - М.: Машиностроение, 1989. - 640 с.

6. Инструментальные стали. Справочник / Позняк Л.А. и др. - М.: Металлургия, 1977. - 168 с.

7. Матюха П.Г. Алмазное шлифование с управлением параметрами рабочей поверхности круга. // Резание и инструмент. 1993. Вып. 48. С.33-35.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛОГИХ ОБОЛОЧЕК

Мизин В.М.

Полотие оболочки двойкой кривизны часто встречаются как несущие элементы во многих инженерных сооружениях и в машиностроении, в частности:

Напряженно-деформированное состояние таких оболочек описывается системой двух дифференциальных уравнений относительно функций напряжений и перемещений /1/. Введением разрешающей функции задача сводится к одному дифференциальному уравнению восьмого порядка и решается, например, с помощью двойных тригонометрических рядов. Далее через эту функцию определяются компоненты напряженно-деформированного состояния: перемещения, моменты, усилия и т.д.

В работе /2/ разработаны и применены оптимальные разностные операторы для численного интегрирования уравнений полоти оболочек при различных загрузках и граничных условиях.

Объем вычислительной работы сокращается, если для исследования нагибного напряженного состояния полоти оболочек использовать дифференциальное уравнение с разрешающей функцией — обобщенным моментом, введенным в практику в работе /3/

$$\nabla^2 \nabla^2 M + \frac{E\delta}{DR^2} M = -\nabla^2 Z, \quad (I)$$

где $M = \frac{M_1 + M_2}{1 + \nu} = -D \nabla^2 W$ — обобщенный момент;

$$M_1 = -D \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right),$$

$$M_2 = -D \left(\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right) \quad \text{— изгибающие моменты;}$$

$$W = W(x, y) \quad \text{— функция перемещений;}$$

$$Z = Z(x, y) \quad \text{— вертикальная составляющая нагрузки.}$$

Рассмотрим численное интегрирование уравнения (I) с помощью обычной и специальной конечно-разностной аппроксимации при некоторых граничных условиях:

$$1) \quad x = \pm a/2 \quad W = \frac{\partial W}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

$$2) \quad y = \pm b/2 \quad W = \frac{\partial W}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

Это приводит к условиям относительно искомой функции:

$$\nabla^2 M = -q; \quad \left. \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x} (\nabla^2 M + q) = 0 \end{array} \right\} x = \pm a/2 \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (\nabla^2 M + q) = 0 \quad (5)$$

$$\nabla^2 M = -q; \quad \left. \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial y} (\nabla^2 M + q) = 0 \end{array} \right\} y = \pm b/2 \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} (\nabla^2 M + q) = 0 \quad (7)$$

Например: квадратная в плане ($a \times a$) полотая оболочка загружена нагрузкой $q = \text{const}$. Опирается по контуру соответствует случаям 4-7; принимаем $E\delta/DR^2 = 2 \text{ (м}^{-4}\text{)}$.

Применяет обычный метод сеток /4/. При квадратной сетке уравнение (I) запишется так:

$$(20 + 2h^4) M_i - 8(M_k + M_e + M_m + M_n) + 2(M_p + M_q + M_r + M_o) + M_s + M_t + M_u + M_v = 0 \quad (8)$$

При составлении уравнений для точек предконтурного ряда и для контурных точек (момент на контуре не равен нулю) в уравнения будут входить значения искомой функции в законтурных точках. Значения функции M в этих узлах выражаются через значения в контурных точках на основании условий (4-7) следующим образом (точка совмещена с контуром):

$$M_k = 4 M_i - M_m - M_n - M_e - qh^2; \quad (9)$$

$$M_s = 18 M_i - 8(M_m + M_k + M_e) + 2(M_p + M_r) + M_v + M_t + M_u - qh^2 \quad (10)$$

Учитывая полученные значения функции M в законтурных точках, уравнение (I) для точек предконтурного ряда (кроме углового предконтурного) запишем так:

$$(19 + 2h^4) M_i - 2(0,5 M_k + M_e + M_m + M_n) + 2(M_p + 0,5 M_q + M_r + 0,5 M_o) + M_t + M_u + M_v = qh^2. \quad (II)$$

Уравнение (I) для угловой точки предконтурного ряда выглядит таким образом:

$$(18+2h^4)M_i - 8(0,5M_k + 0,5M_n + M_e + M_m) + 2(M_r + 0,5M_p + 0,5M_o) + M_t + M_u = 2qh^2. \quad (I2)$$

Для точек контурного ряда конечно-разностное уравнение (I) будет таким

$$(1+h^4)M_i - 4M_e + M_m + M_n + M_t = -qh^2. \quad (I3)$$

В угловых точках контура $M = 0$. Обозначение точек (узлов) сетки принято по работе /4/.

Применяя последовательно сетку с шагом $h = a/4$; $a/8$ и $a/16$ задачу сводим к решению систем соответственно 5, 14 и 44 алгебраических уравнений. Найденные значения обобщенных моментов в точках на оси ($y = 0$) представлены в таблице I.

Таблица I

Точки	Сетка	К-во уравнений	M (обычные разности)	Расх. %	M (оптимальные разности операторы)	Расх. %
$x = 0$ $y = 0$	4x4	5	0,333 q	10,3	0,324 q	12,7
	6x6	9	0,353 q	5,0	0,358 q	3,51
	8x8	14	0,361 q	2,6	-	-
	16x16	44	0,374 q	0	-	-
$x = a/2$ $y = 0$	4x4	5	- 0,383 q	35,7	- 0,526 q	11,6
	6x6	9	- 0,492 q	17,4	- 0,588 q	1,8
	8x8	14	- 0,542 q	9,05	-	-
	16x16	44	- 0,578 q	0,44	-	-

Наибольший стрессовый момент возникает на опоре, причем, так как здесь

$$\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} = 0, \quad M = -D \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} = M_1,$$

т.е. обобщенный момент на опоре равен изгибающему. Наибольший

положительный момент в центральной точке ($x=0, y=0$) равен:

$$M_1 = M_2 = \frac{1+\nu}{2} M$$

Для оценки и анализа полученных результатов определены моменты в характерных точках обычным путем, т.е. через перемещения при сетке с шагом $a/16$ (система 36 алгебраических уравнений). При этом моменты на опоре отличаются на 0,44%, а в центре оболочки совпали с точностью вычислений.

Объем вычислительной работы сокращается, если воспользоваться разностными операторами /3/. Уже при сетке с шагом $h = a/4$ (система 5 алгебраических уравнений) получаем моменты, отличные от полученных обычным методом сеток при $h = a/16$ (44 уравнения) на 12,7%.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что уравнение (I) можно успешно использовать для оценки изгибного напряженного состояния пологих оболочек и подтверждают эффективность применения при этом оптимальных разностных операторов, разработанных в работе /2/.

ЛИТЕРАТУРА

1. Власов В.З. Общая теория оболочек. М., Гостехиздат, 1949 г.
2. Рекшинский В.С., Мизин Б.М. Расчет пологих оболочек на действие местных нагрузок. "Известия вузов. Строительство и архитектура", № 3, 1970.
3. Бобров Э.Ш. Расчет пологих оболочек на сеточном электроинтеграторе. "Строительная механика и расчет сооружений", № 4, 1966 г.
4. Варвак П.М. Развитие и приложение метода сеток к расчету пластин. Часть I, 1949 г., часть II 1952 г. Киев, издательство АН УССР.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЭВОЛЮЦИОННОГО ПРОЦЕССА РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Михайлов А.Н.

Современная эпоха научно-технического прогресса сделала еще более актуальной проблему создания и развития высокоэффективных технологий в машиностроении. Это обусловлено потребностью повышения свойств и полезности изделий, а также все возрастающим их количеством и многообразием. Творческое осмысление процесса создания прогрессивных технологий показывает, что они выполняются на основе общих тенденций действующих в технике /1,2/, а также новых - возникающих благодаря прогрессу науки и техники /3/. Однако разработка их остается сложной задачей, решение которой неизбежно связано с длительными наукоемкими исследованиями фундаментального и прикладного характеров. Поэтому в данной работе, для повышения эффективности и упрощения процесса разработки новых технологий, предлагается общая методология их создания с применением методов моделирования, позволяющих рационально построить, определить взаимосвязи и обеспечить требуемые их характеристики.

Технологии машиностроения относятся к сложным системам, которые могут быть представлены совокупностью хорошо структурированных и взаимосвязанных объектов, подчиняющихся действию как общих, так и частных законов техники /3,4/. Поэтому для их создания широко должны использоваться модели, позволяющие нам понять структуру будущей технологии, сбалансировать требования, состав и наметить схему ее применения. В этом случае, моделирование позволяет реализовать принципы декомпозиции, абстракции и иерархии, что значительно упрощает эти процессы. Модели дают нам возможность исследовать особенности и недостатки технологий в условиях, задаваемых нами самими и обусловленных реальностью. Они создают условия для объяснения и прогнозирования процесса развития технологий, вызванного непрерывным прогрессом науки и техники.

Сложные системы, к которым относятся современные технологии, не просто иерархичны. Их уровни иерархии отражают различные уровни абстракции, вытекающие друг из друга и обладающие при этом определенной степенью автономности. Для каждой конкретной практической задачи рассматривается соответствующий

уровень абстрагирования. Например, рассмотрение проблемы и факторов эволюционного процесса развития технологий следует начинать на верхних иерархических уровнях абстрагирования и при этом использовать соответствующие модели.

На рис.1 показана общая структурная модель макросистемы с внешними и внутренними отношениями (связями) верхнего иерархического уровня абстрагирования, содержащая следующие объекты или сферы (элементы): 1 - общество; 2 - экономика; 3 - наука и техника. Объекты этой системы взаимодействуют между собой посредством внешних отношений F_i^j , где i - номер объекта оператора, а j - номер объекта операнда. Каждый объект макросистемы является одновременно - оператором, когда он действует на соседние объекты, и - операндом, когда на него действуют соседние объекты. Петли на каждом объекте макросистемы определяют отношения F_i^i , где i - номер объекта оператора и операнда, и обеспечивают поддержание состояния и внутреннее развитие данного объекта на рассматриваемом уровне иерархии.

При исследовании процесса развития технологий следует иметь в виду, что общество, экономика, наука и техника развиваются взаимосвязанно. Комплекс этих объектов и динамика отношений между ними определяют процесс эволюции макросистемы (рис.1), который находится под влиянием трех главных факторов: технического уровня, экономического потенциала и заинтересованности. При этом развитие современных технологий базируется на определенных целях общества, вытекающих из них задачах и возникающих в данный период времени t_k запросах $A(t_k)$. С развитием цивилизации эти цели и задачи постоянно изменяются, а запросы возрастают.

Одновременно с развитием общества происходит развитие науки и техники, появляются знания, которые позволяют применять новые материалы, технологическое оборудование и технические решения. Техника создает возможности $B_2(t_k)$ для создания требуемого продукта или изделий. Прогресс техники обуславливает повышение возможностей $B_3(t_k)$ в создании нового продукта (изделий). Наука реализует поступательное развитие техники, которое в свою очередь ведет к прогрессу науки. В этом случае, технологии служат средством для изготовления продукта или изделий. Причем для создания нового продукта необходимы новые технологии. Здесь важным условием является наличие новой информации о прогрессе науки и техники, а также приемлемая степень риска

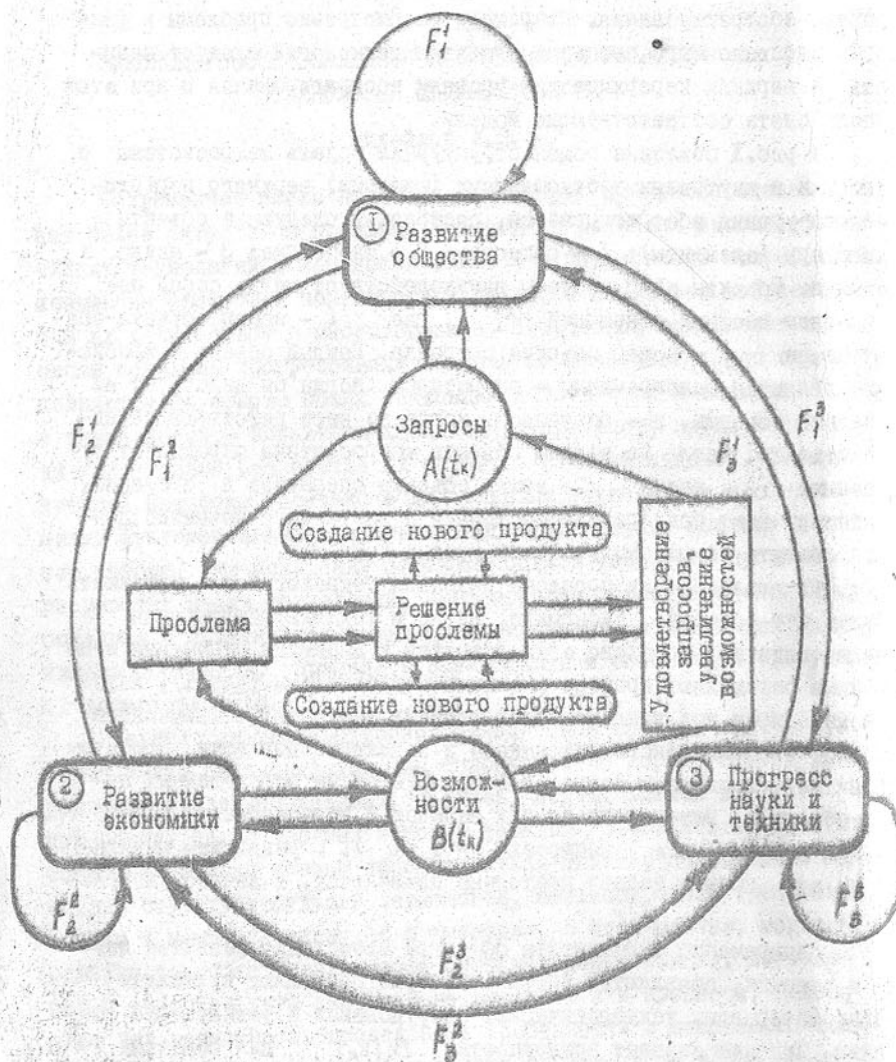


Рис.1. Общая структурная модель макросистемы с объектами верхнего уровня абстрагирования

и полет фантазии.

Закономерность эволюционного процесса развития технологий заключается в том, что удельный вес затрат прошлого труда, необходимого для разработки прогрессивных технологий непрерывно возрастает. Это создает предпосылки к реализации качественно новых технологий, имеющих новые свойства или обеспечивает возможность повышения качества существующих, при общем уменьшении трудовых затрат. Для этого должны широко использоваться опыт проектирования прогрессивных технологий, накопленный в передовых технологических и проектно-конструкторских организациях в отношении применения оправдавших себя на практике технологий, нетрадиционных методов изготовления изделий, новых орудий и средств обработки. Создаваемые технологии должны удовлетворять все возрастающим потребностям людей, которые с развитием цивилизации изменяются и ведут к непрерывному развитию науки и техники.

Вместе с тем, создание и развитие новых прогрессивных технологий может быть полно достигнуто только при благоприятной экономической ситуации, которая образует экономические возможности $B_e(t_k)$ для прогресса объектов макросистемы (рис.1).

Возможности экономики $B_e(t_k)$, а также науки и техники $B_s(t_k)$ образуют общие возможности $B(t_k)$, которые можно представить с помощью логического выражения:

$$B(t_k) = B_e(t_k) \wedge B_s(t_k),$$

где $B(t_k)$ — общие возможности экономики, науки и техники в момент времени t_k ;

$B_e(t_k)$ — возможности экономики в момент времени t_k ;

$B_s(t_k)$ — возможности науки и техники в момент времени t_k .

Главной особенностью эволюционного развития макросистемы (рис.1) является стремления всех объектов, характеризуемых материальными, энергетическими и информационными параметрами, к равновесному состоянию, которое поддерживается с помощью отношений F_i^j . При этом внутреннее развитие каждого объекта макросистемы, поддерживаемое связью F_i^i , выводит макросистему из равновесного состояния. Посредством отношений F_i^j объекты макросистемы опережающим (отстающим) развитием ускоряют (замедляют) развитие других объектов макросистемы. Такая динамика состояний объектов ведет к прогрессивному (регрессивному) развитию всех подсистем макросистемы.

На эволюцию макросистемы (рис.1) и технологий в частности, оказывают влияние и другие факторы, которые определяют степени свободы развития объектов макросистемы. Полное их развитие зависит от уровня сложности объектов, общего числа степеней свободы их развития и наличия задействованных ресурсов. К ним могут быть отнесены факторы, связанные с наличием сырья, стратегических материалов, энергии, информации, трудовых и других ресурсов. Для объектов макросистемы существуют оптимальные значения их параметров, которые обеспечивают экстремальный уровень прогрессивного развития технологий и других объектов макросистемы.

Анализ процесса прогрессивного развития объектов макросистемы показывает, что когда запросы общества $A(t_k)$ больше чем общие возможности $B(t_k)$ экономики, науки и техники $A(t_k) > B(t_k)$ возникает проблема во внутренних связях объектов, то есть когда существующие в момент времени t_k возможности не могут удовлетворить потребности общества. Это связано с тем, что с развитием цивилизации, внутреннее развитие общества поддерживаемое связью F_i^j (рис.1) увеличивает его потребности и соответственно непрерывно повышает запрос $A(t_k)$. Когда возникает проблема развитие всех объектов макросистемы направлено на решение этой проблемы, которая, например, может быть удовлетворена посредством создания нового продукта (изделия). Это достигается только благодаря созданию новых прогрессивных технологий, которые являются предшественником техники для изготовления нового продукта.

При решении проблемы реализуется удовлетворение запросов общества $A(t_k)$ и повышение возможностей $B(t_k)$ науки, техники и экономики. В этот период запросы общества $A(t_k)$ и возможности $B(t_k)$ эквивалентны $A(t_k) = B(t_k)$ и объекты макросистемы находятся в равновесии.

Если возможности $B(t_k)$ макросистемы, инициируемые внутренними отношениями F_i^j и F_j^i развития, больше запросов $A(t_k)$, то в данный момент произошло опережающее развитие экономики и/или науки и техники. Посредством воздействий объектов макросистемы, реализуемых внешними связями запросы общества возрастают и макросистема снова стремится к равновесному состоянию параметров объектов.

Колебания состояний объектов макросистемы вызывают динамику параметров процесса поступательного развития объектов макро-

системы, колеблющихся в пределах ε . Чем меньше эти пределы, тем гармоничнее без запаздывания параллельно развиваются объекты макросистемы и активнее действуют отношения F_i^j между ними. На прогрессивное развитие объектов макросистемы оказывают влияние факторы параллельности, непрерывности и устойчивости функционирования всех подсистем.

Для изучения влияния количественных и качественных параметров объектов (элементов, подсистем) различного иерархического уровня на создаваемую технологию разработана структурная модель континуума объектов техносферы, представленная на рис.2 и имеющая мощность $(n+1)$ объектов. Эта модель позволяет исследовать процессы, выявлять взаимосвязи и определять характеристики исследуемого объекта на различных иерархических уровнях абстрагирования техносферы. При этом на каждом уровне иерархии структура объекта (технологии) содержит свои определенные качественные и количественные характеристики.

В структурной модели континуума объектов техносферы каждый объект a_i является оператором — когда он действует на другие объекты и операндом — когда на него действуют другие объекты. Отношения между объектами F_i^j модели (рис.2) на каждом иерархическом уровне моделируются с помощью воздействий, реализуемых потоками материального, энергетического и информационного типов:

$$F_i^j = F_i^j(t_k) = S_i^j(t_k) \cup E_i^j(t_k) \cup I_i^j(t_k),$$

где F_i^j — отношения между объектами или воздействие i -го объекта на j -й объект модели;

$F_i^j(t_k)$ — отношение между объектами в момент времени t_k ;

$S_i^j(t_k)$ — материальное воздействие i -го объекта на j -й объект в момент времени t_k ;

$E_i^j(t_k)$ — энергетическое воздействие i -го объекта на j -й объект в момент времени t_k ;

$I_i^j(t_k)$ — информационное воздействие i -го объекта на j -й объект в момент времени t_k .

Поддержание состояния данного объекта реализуется отношениями F_i^i , показанными на рис.2 с помощью петель, которые могут быть реализованы потоками материального, энергетического и информационного типов

$$F_i^i = F_i^i(t_k) = S_i^i(t_k) \cup E_i^i(t_k) \cup I_i^i(t_k).$$

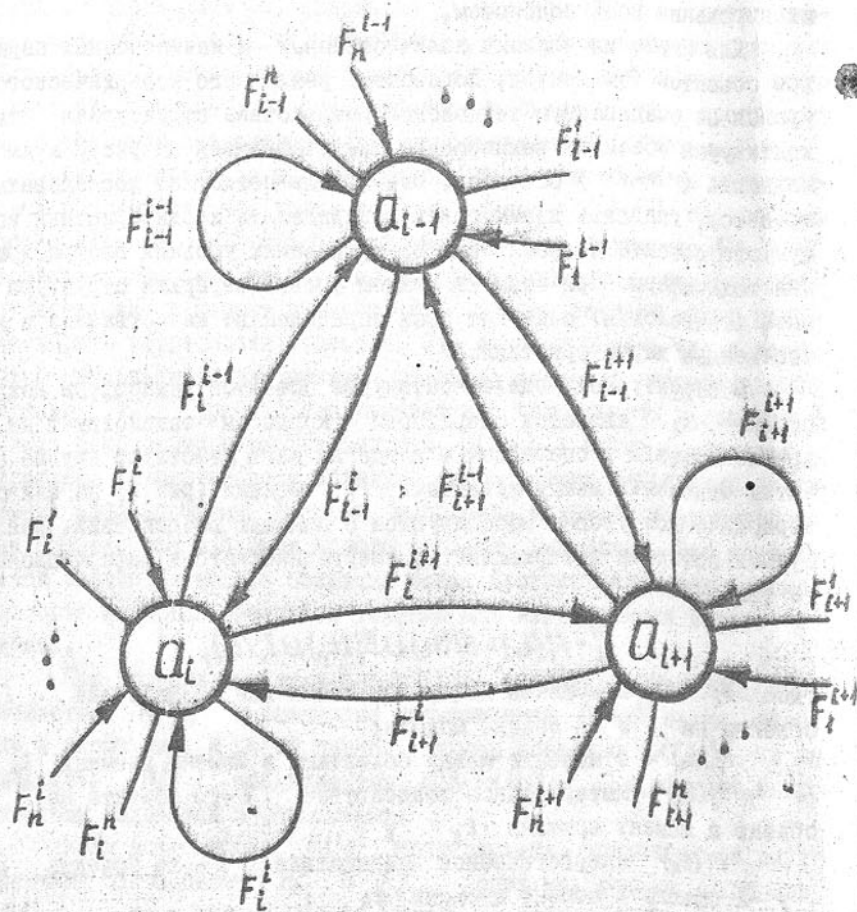


Рис.2. Структурная модель континуума объектов техносферы

Представленная на рис.2 структурная модель является открытой к развитию, так как мощность (общее число) объектов $N_i = (n+1)$ на каждом иерархическом уровне R может изменяться в соответствии с увеличением объема задействованных ресурсов, систем (технологий), суперсистем, сфер. Каждая система (технология) всегда стремится к увеличению размерности многообразия объектов (иерархии по номенклатуре классов объектов) и многообразия объектов (иерархии по составу объектов).

С увеличением числа объектов системы (модели), каждый объект получает дополнительные воздействия или связи от этих объектов, но и он должен также сам действовать на них. Это обеспечивает возникновение дополнительных степеней свободы модели на данном иерархическом уровне. Для этого необходимо привлечение дополнительных объемов ресурсов.

При нарушении прямых связей между двумя взаимодействующими объектами процесс их развития замедляется из-за отсутствия взаимных воздействий. Однако взаимные воздействия этих объектов проявляются через другие объекты и связи системы. Когда все связи с каким-то объектом системы обрываются, он находится в изоляции и развитие реализуется посредством воздействия F_i^i , обеспечивающего поддержание состояния данного объекта. С уменьшением числа объектов и связей системы ее поведение имеет регрессивное развитие вплоть до полной ликвидации (система умирает). Но это может повлечь создание и развитие новой системы с более высоким качественным уровнем структуры и параметров.

На рис.3 представлена модель системы технологических преобразований (базовая модель технологии). Она является a_i элементом (объектом) модели рис.2. С помощью этой модели (рис.3) можно рассматривать вопросы анализа, синтеза, реализации, функционирования, эволюции, модификации и ликвидации технологий. Она дает возможность комплексно решать задачи создания прогрессивных технологий нового поколения. Использование моделей рис.1,2,3 позволяет решать задачи систематики технологий в технике, и в частности в машиностроении, их эволюции и модификации.

Модель системы технологических преобразований (модель технологии), представленная на рис.3, состоит из объектов (элементов, подсистем) определенного иерархического уровня являющихся одновременно операторами и операндами системы. Основными объектами модели являются: кадровое обеспечение, техническое обеспе-

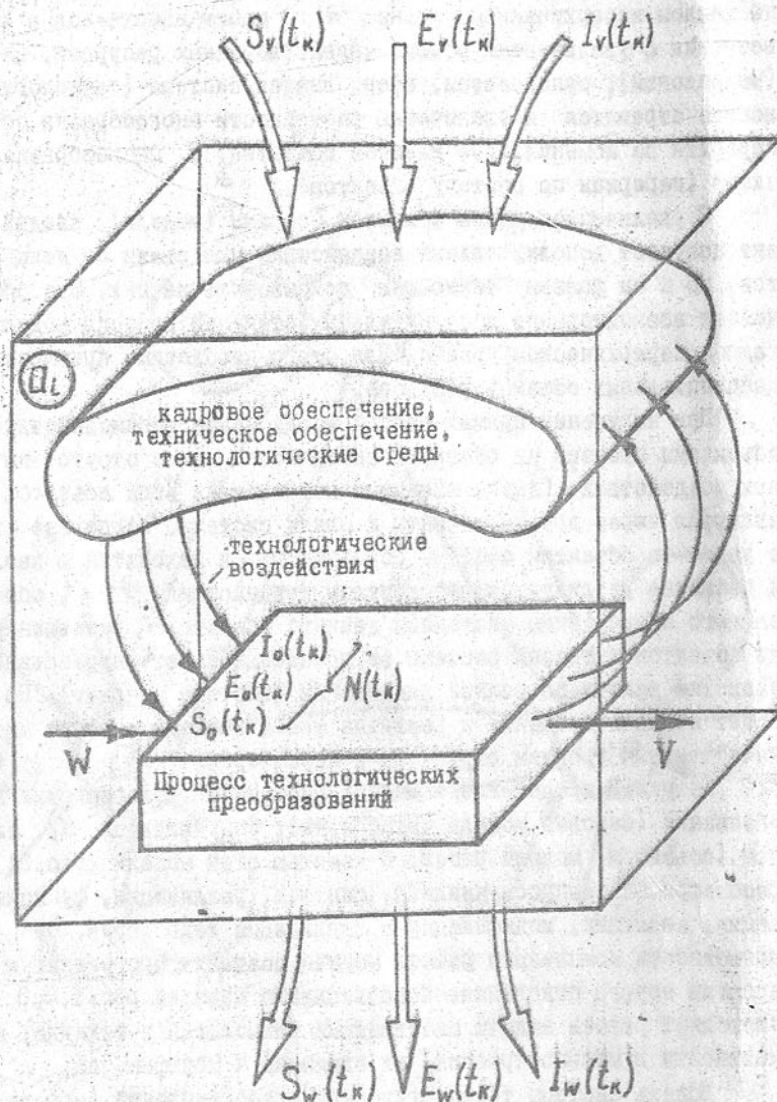


Рис.3. Модель системы технологических преобразований (базовая модель технологии)

чение и технологические среды. Они осуществляют заданное технологическое воздействие $N(t_k)$ материального $S_o(t_k)$, энергетического $E_o(t_k)$ и информационного $I_o(t_k)$ типов на предметы обработки (заготовки, изделия) и реализуют процесс технологических преобразований заготовок в изделия, которые имеют вход V и выход W . Сам процесс технологических преобразований имеет обратную связь с обеспечивающими объектами системы. Обратная связь позволяет получать сведения о количественных и качественных параметрах процесса технологических преобразований, дает возможность многократного использования средств технологического воздействия, организовать их поточность и непрерывность функционирования.

Все объекты системы технологических преобразований функционируют в пространстве и во времени, поэтому между ними действуют пространственно-временные отношения. Ограничены объекты модели пространственной границей, определяющей эту систему как функциональную единицу или объемно-пространственную производственную ячейку.

Воздействия оказываемые на систему технологических преобразований со стороны других систем могут быть представлены следующим множеством:

$$F^i = \{F_1^i, F_2^i, \dots, F_n^i\} = S_v(t_k) \cup E_v(t_k) \cup I_v(t_k),$$

где F^i — вектор обобщенного входа;

$S_v(t_k)$ — входные обобщенные воздействия материального типа в момент времени t_k ;

$E_v(t_k)$ — входные обобщенные воздействия энергетического типа в момент времени t_k ;

$I_v(t_k)$ — входные обобщенные воздействия информационного типа в момент времени t_k .

Входные воздействия оказывают различное действие на систему технологических преобразований. Основные задачи входных воздействий F^i следующие: обеспечение необходимой структуры объектов, реализация требуемого поведения объектов, восстановление потоков технологического воздействия орудий и средств обработки на изделия и другие.

Воздействия реализуемые системой технологических преобразований на другие системы могут быть описаны следующим образом:

$$F_o = \{F_1^o, F_2^o, \dots, F_n^o\} = S_w(t_k) \cup E_w(t_k) \cup I_w(t_k),$$

где F_o — вектор обобщенного выхода;

$S_w(t_k)$ - выходные обобщенные воздействия материального типа в момент времени t_k ;
 $E_w(t_k)$ - выходные обобщенные воздействия энергетического типа в момент времени t_k ;
 $I_w(t_k)$ - выходные обобщенные воздействия информационного типа в момент времени t_k .

Входные и выходные обобщенные воздействия включают как основные потоки различных типов, направленные на прогрессивное развитие системы, так и побочные (вредные, сопутствующие), оказывающие отрицательное влияние на качественные показатели развития.

Проектирование технологии подразумевает учет противоречивых требований, причем продуктами его являются модели, позволяющие нам понять структуру будущей технологии. Однако разработка технологии остается до сих пор трудоемким процессом, целью которого является: обеспечение требуемого алгоритма функционирования (технологического воздействия); реализация приемлемой цены; удовлетворение явным и неявным требованиям по эксплуатационным качествам, ресурсопотреблению и дизайну; удовлетворение требованиям к стоимости и продолжительности разработки технологии. При этом процессы проектирования технологий могут выполняться по различным схемам. На рис. 4, а показаны этапы традиционного жизненного цикла технологии, характеризуемого лавинообразным нарастанием сложности. Во многих компаниях и фирмах такую схему создания технологий рассматривают как неизбежную. Однако несмотря на силу традиций, анализ жизненного цикла технологии показывает следующие недостатки этой схемы:

- непригодность для разработки сложных технологий, состоящих из большого количества подсистем и автономных модулей, образующих сетевые структуры;
 - обязательно последовательное выполнение всех этапов создания технологии;
 - несовместимость с эволюционным подходом;
 - несовместимость с перспективными методами автоматизированного проектирования и управления технологиями.
- Поэтому для создания прогрессивных технологий традиционные методы не подходят.

В настоящее время начинает развиваться объектно-ориентированное проектирование [5], что особенно перспективно для создания новых технологий. В основе объектно-ориентированного проек-

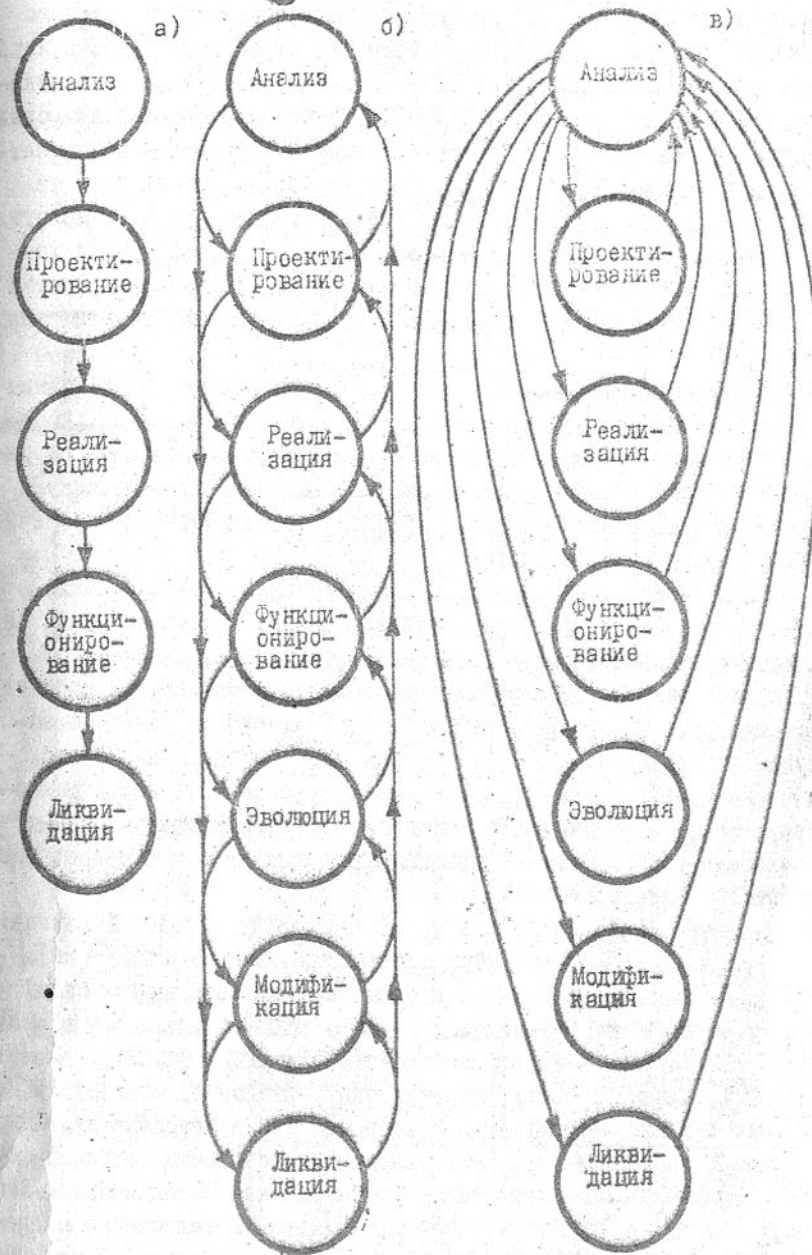


Рис. 4. Этапы жизненного цикла технологии

тирования лежит объектный подход, главными принципами которого является: абстрагирование, ограничение доступа, модульность, иерархичность, типизация, параллелизм и устойчивость. На рис. 4, б показаны этапы жизненного цикла технологии при объектно-ориентированном проектировании. Здесь процесс создания технологии не является отдельным монолитным этапом. Он представляет собой один из шагов на пути последовательной итеративной разработки технологии, при этом последовательность шагов может иметь произвольный характер. Частный вариант последовательной итеративной разработки технологии с направленными шагами через анализ представлен на рис. 4, в.

Применение описанных моделей позволило определить основные характеристики прогрессивных технологий нового поколения, которые дополнив известными данными [6, 7, 8] можно представить структурной схемой, изображенной на рис. 5. Она имеет иерархическую структуру и содержит: основные признаки, особенности и обеспечение прогрессивных технологий.

Подобно тому как искусство реализуется в произведениях, а талант — в красоте этих произведений, техника проявляет себя в изделиях, а качество их — в совокупности свойств и полезности. В технике, технологии служат средством для изготовления изделий. Поэтому судить о прогрессивности новых технологий нужно по конечным результатам, а именно по изделиям. На основании этого, основные признаки, характеризующие прогрессивность новых технологий, даны на структурной схеме (рис. 5) относительно конечного результата их действия — изделий. Эти признаки можно представить следующими категориями:

- качественно новая совокупность свойств изделий (причина);
- качественно новая мера полезности изделий (следствие).

Изготавливаемые изделия всегда являются носителями самых различных свойств. С развитием науки и техники создаются возможности для улучшения имеющихся свойств изделий, например, геометрических, кинематических, механических, тепловых, оптических и других. А также реализуются качественно новые свойства изделий, например, экологические, манипуляционные, отражения жестких космических лучей, обладания эффектом "магнитная потенциальная яма" и другие. Для обеспечения этого проектируемые технологии непрерывно совершенствуются и создаются качественно новые, а это значит, что они будут постоянно улучшать и создавать качественно новые свойства изделий.

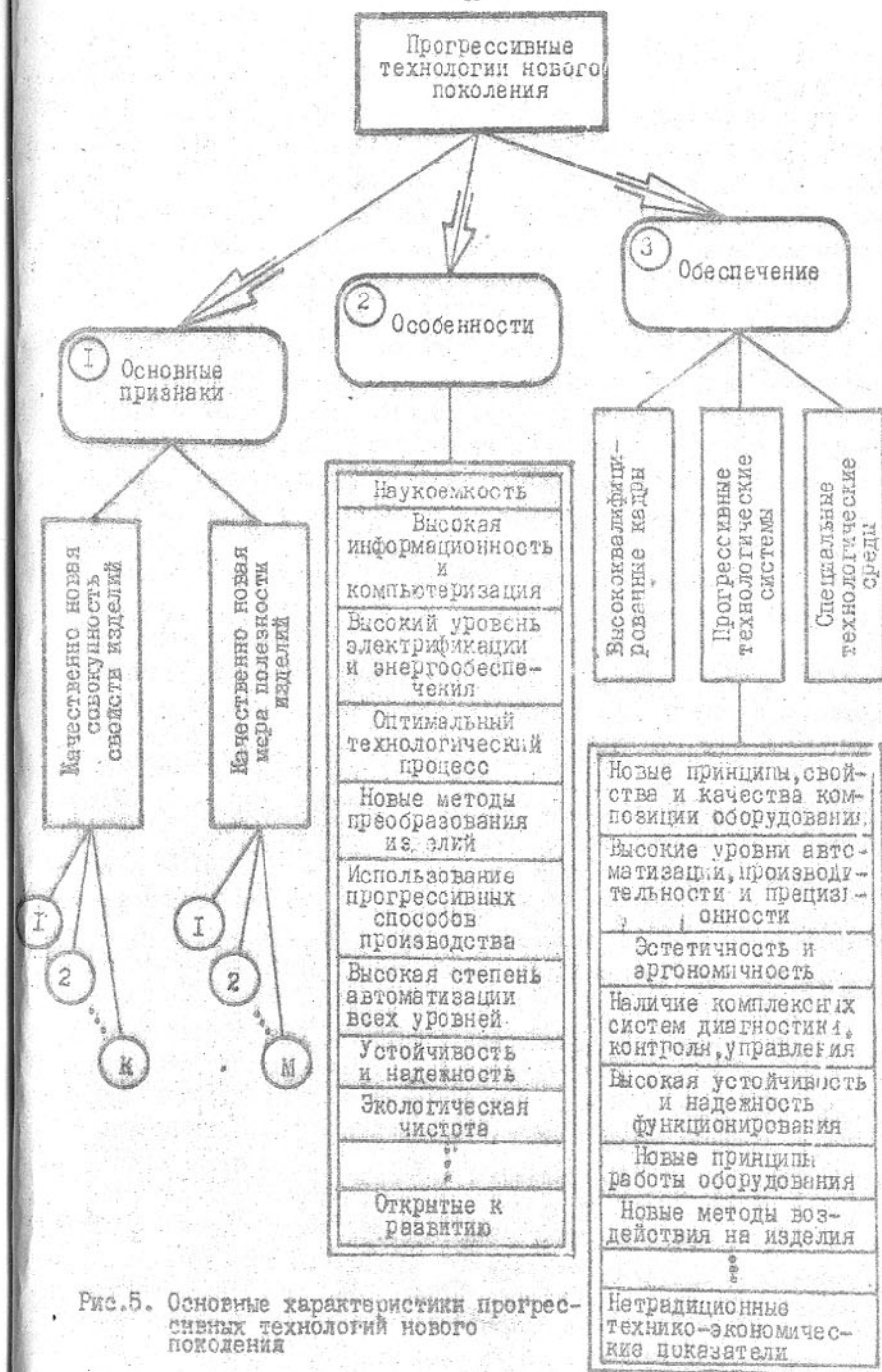


Рис. 5. Основные характеристики прогрессивных технологий нового поколения

Однако только мера этих свойств — полезность изделий или их ценность имеет решающее значение, так как конечной целью изготовления любого изделия является обеспечение необходимой ценности. Создаваемые прогрессивные технологии непрерывно повышают ценность изделий и соответственно реализуют качественно новую меру их полезности, например, обеспечивается возможность использования их в работах n -го поколения, для "гипердвигателей" межгалактических кораблей, для марсианского транспорта построенного по принципу мехатроники и другие.

Создаваемые прогрессивные технологии нового поколения имеют некоторые базовые особенности. Основные из них могут быть связаны с высокой наукоемкостью их создания, сложностью реализации и функционирования. При этом необходима высокая информационность и компьютеризация, потребен определенный уровень электрификации и энергообеспечения. В этом случае, проектирование новых технологий должно базироваться на оптимальных технологических процессах. При необходимости могут быть использованы новые методы преобразования заготовок в изделия. Для этого должны применяться прогрессивные способы производства. На всех этапах жизненного цикла (рис. 4) новых технологий необходимо обеспечивать высокую степень автоматизации процессов. Созданные технологии должны иметь высокую устойчивость и надежность функционирования по заданному алгоритму. Все это должно быть тщательно проработано на основе принципов объектно-ориентированного подхода и обеспечена экологическая чистота технологий. Вместе с тем, создаваемые технологии должны быть открытыми к развитию и иметь возможность эволюционировать и модифицироваться в соответствии с изменяющимися внешними условиями. Кроме того, прогрессивные технологии могут иметь ряд других особенностей относящихся к специальным технологиям или технологиям будущего.

Для создания прогрессивных технологий нового поколения необходимо нетрадиционное обеспечение, а именно: высококвалифицированные кадры, прогрессивные технологические системы и специальные технологические среды. В этом случае, проектирование технологических систем должно прежде всего определяться конъюнктурой рынка; основываться на новых принципах, свойствах и качестве композиции элементов оборудования; иметь высокие уровни автоматизации, производительности и прецизионности оборудования, оснастки и инструментов. Созданные технологические системы должны

быть эстетичны и эргономичны, иметь высокую устойчивость и надежность функционирования. Для этого широко должны быть использованы комплексные системы диагностики, контроля и управления, а также новые принципы работы оборудования и методы воздействия орудий и средств обработки на изделия. Такой комплексный подход в создании прогрессивных технологических систем дает качественно новые нетрадиционные технико-экономические показатели их создания и функционирования /7/.

Проведенные исследования с использованием разработанных моделей позволили определить и дополнить известные тенденции /1, 2, 3/ прогрессивного развития технологий — новыми, к которым можно отнести следующие:

- повышение концентрации и параллелизма технологических зон обработки, обеспечивающих повышение производительности;
- создание нетрадиционных прогрессивных пространственных структур технологических зон обработки (создание многомерных циклических структур, повышение размерности многообразия и объектов в каждом многообразии структуры), реализующих повышение технологических возможностей пространства и среды;
- компоновка технологических зон обработки в линейные, поверхностные и объемные структуры; компоновка этих структур в производственные ячейки; компоновка производственных ячеек в пространственные структуры и заполнение ими всего объема пространства производственного цеха с возможностью изменения их пространственного расположения;
- повышение степени компактирования структуры за счет увеличения плотности (линейной, поверхностной, объемной) технологических зон обработки;
- организация поточности функционирования технологических зон обработки и повышение их интенсивности;
- повышение непрерывности и устойчивости функционирования технологических систем в соответствии с заданным алгоритмом;
- повышение информационности технологий, снижение массы технологических систем и повышение их энергообеспеченности;
- создание технологий и технологических систем с использованием принципов мехатроники;
- упрощение функциональной структуры за счет совмещения различных функций технологических систем; выполнение технологических функций посредством транспортных функций и наоборот;

— применение комплексных систем диагностики, контроля и управления процессами.

Анализ этих тенденций позволил сформулировать и разработать общий теоретический подход в создании и функционировании нетрадиционных технологических систем, именуемых поточно-пространственные технологические системы /9/. Эти технологические системы имеют качественно новые свойства и возможности, а также существенно повышают уровень автоматизации и интенсификации производственных процессов. Разработанная общая методика синтеза дает возможность создавать поточно-пространственные технологические системы непрерывного действия следующих видов:

— технологические системы высокой и сверхвысокой производительности для производства изделий медицинской (лекарственные таблетки, брикеты, ампулы и т.п.), радиоэлектронной, пищевой промышленности, приборостроения и других отраслей народного хозяйства;

— технологических систем непрерывного действия для длительных циклов технологического воздействия (термические, химические, физико-химические и другие методы обработки);

— технологических систем непрерывного действия для комплексной обработки изделий;

— гибких технологических систем непрерывного действия.

Эти технологические системы позволяют значительно повысить производительность производственных процессов, снизить занимаемые оборудованием производственные площади, уменьшить длительность производственного цикла, число рабочих занятых в производстве и улучшить другие показатели.

В заключении можно отметить, что предлагаемая методология ориентирована на конечную цель — создание прогрессивных технологий, дает возможность видеть взаимосвязи, понимать и применять целостность как принцип проектирования. Создаваемые технологии являются отражением современного развития техники, теории их создания позволяет объяснить и предсказывать закономерности эволюционного процесса развития прогрессивных технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматизация процессов машиностроения. Учебн. пособие для машиностроит. спец. вузов /Под ред. А.И. Дашенко. — М.: Высш. шк. 1991. — 480 с.

2. Шаумян Г.А. Комплексная автоматизация производственных процессов. — М.: Машиностроение, 1973. — 639 с.

3. Терник Н.Э. Направленность развития и проблемы оптимизации техносферы. Тезисы докладов. — Харьков: ХПИУ, 1994. — 278 с.

4. Хубка В. Теория технических систем: Пер. с нем. — М.: Мир, 1987. — 208 с.

5. Буч Г. Объектно-ориентированное проектирование с примерами применения: Пер. с англ. — М.: Конкорд, 1992. — 519 с.

6. Грабченко А.И. Некоторые аспекты проблемы высоких технологий. Тезисы докладов. — Харьков: ХПИ, 1992. С. 25-29.

7. Михайлов А.Н. Перспективы развития высоких технологий // Развитие и инструмент. — Харьков: ХПИ, 1993. Вып. 48. С. 39-41.

8. Михайлов А.Н. Некоторые аспекты создания технологий будущего. Тезисы докладов. — Донецк: Дон ГИУ, 1994. С. 87-90.

9. Михайлов А.Н. Разработка методов проектирования высокоэффективных поточно-пространственных технологических систем. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Киев: КИИ, 1992. — 33 с.

ЭЛЕМЕНТЫ СИНТЕЗА СБОРОЧНЫХ СИСТЕМ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Михайлов А.Н., Ищенко А.Л., Маслинко И.И., Костюченко С.В.

В общем случае автоматические системы, будь-то системы для механической обработки, термической..., или для сборочных процессов являются человеко-машинными системами (т.е. человека нельзя рассматривать отдельно от системы, как и нельзя рассматривать систему в отрыве от человека), которые обеспечивают изменение предмета обработки [1,2] целенаправленными воздействиями материального, энергетического и информационного характеров. Эти воздействия могут осуществляться различными способами, при этом выполняемые процессы придают изделиям требуемые свойства и заданное качество.

Исходя из этого, автоматическая сборочная система любого вида (класса) включает в себя кадровое обеспечение, технологическую систему, рабочую среду, внешние материальные S, информационные I и энергетические E потоки, которые поддерживают систему в исходном состоянии, т.е. обновляют ее после каждого цикла технологического воздействия. Для нормального функционирования системы необходимо, чтобы происходил обмен характеристиками между процессом сборки и кадровым обеспечением, технологической системой, рабочей средой, т.е. наличие обратной связи позволяет вносить необходимые корректировки в процесс сборки. На рис.1 представлена общая объемно-пространственная модель автоматической сборочной системы.

Входной поток собираемых элементов V, при поступлении на сборку имеет заранее заданную совокупность свойств, которые в процессе сборки изменяются, и выходной поток собранных изделий W приобретает новые свойства. Параметры свойств заготовок на входе V и собранных изделий на выходе W можно представить следующими векторными выражениями:

$$V = \begin{Bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{Bmatrix};$$

$$W = \begin{Bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{Bmatrix}$$

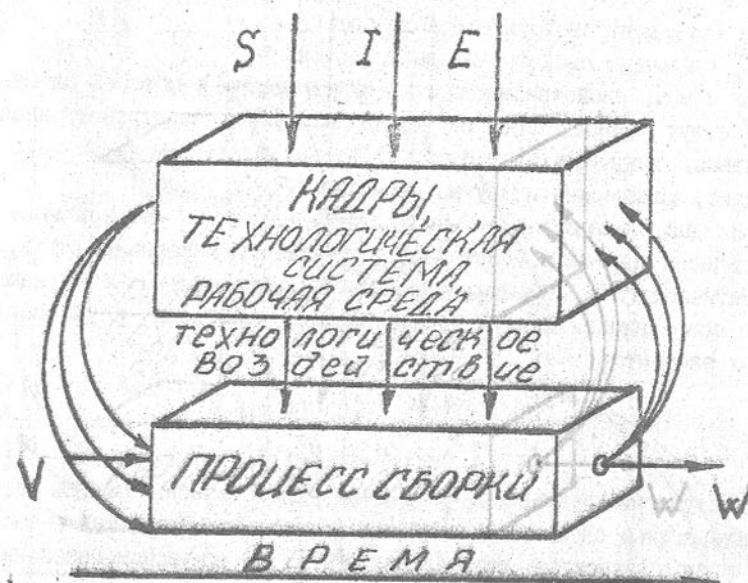


Рис.1 Общая объемно-пространственная модель автоматической сборочной системы.



Рис.2 Объемно-пространственная модель i-ой операции технологического процесса сборки.

большинстве случаев, осуществляет доосновные функции (например: нагрев детали для ее запрессовки), реже выполняют функции параллельно с основными (например: сварка в среде инертного газа). Блоки технологического воздействия осуществляют основные функции, т.е. сборочные операции. Контрольный модуль выполняет послеосновные функции, т.е. осуществляет контроль качества сборки.

В сборочном модуле должен происходить постоянный обмен информацией между БТВ и БЕТВ, это необходимо для нормального функционирования сборочного модуля.

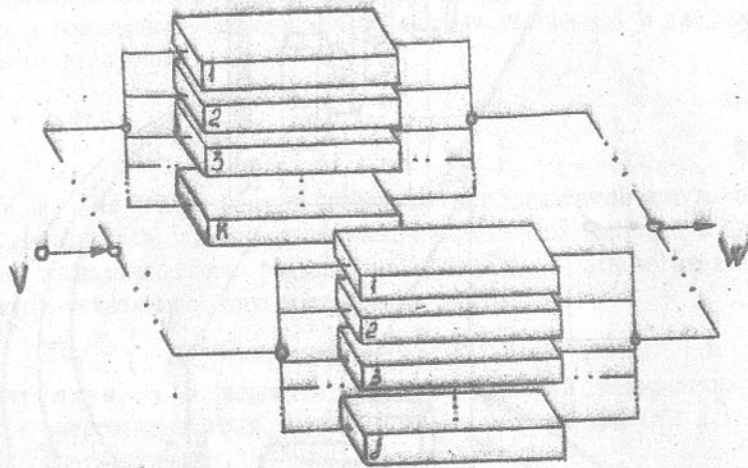


Рис.4 Объемно-пространственная структурная модель БТВ и БЕТВ.

На основании разработанных выше моделей можно анализировать и создавать автоматические сборочные системы: последовательного, параллельного и параллельно-последовательного действия. С помощью полученных моделей можно исследовать состав, структуру и функционирование сборочных систем различных иерархических уровней. Это позволяет реализовать системный подход при анализе и синтезе автоматических сборочных систем, а также создавать высокоэффективные сборочные системы непрерывного действия.

ЛИТЕРАТУРА

И.Лебедевский М.С., Вейц В.Л., Федотов А.И. Научные основы автоматической сборки. - Л.: Машиностроение, 1985. - 316 с.

2. А.П. Михайлов Разработка методов проектирования высокоэффективных поточно-пространственных технологических систем. Дис. на соиск. уч. степени д-ра техн. наук, - Харьков, 1991. - 498 с.

СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ СТУПЕНЧАТЫХ ОТВЕРСТИЙ ОСЕВЫМ КОМБИНИРОВАННЫМ ИНСТРУМЕНТОМ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

МИХАЙЛОВ А.Н., МАЛЫШКО И.И., ИЩЕНКО А.Л.

Дальнейшее развитие научно-технического прогресса ведет к непрерывному усложнению конструкций машин, оборудования, увеличению номенклатуры обрабатываемых деталей. Что в свою очередь приводит к повышению сложности и многообразия обрабатываемых поверхностей деталей машин.

Помимо этого, трудность подбора номенклатуры зачастую ограничивает применение технологических систем непрерывного действия (ТСНД). Поэтому возникает необходимость в систематизации и классификации процессов формообразования и разработке их структурно-логической модели для увеличения возможностей группирования деталей по сходству технологических процессов.

Анализ показал, что наиболее технологичными поверхностями для механической обработки на ТСНД являются внутренние соосные поверхности отверстий, составляющие в машиностроении до 35% всех обрабатываемых поверхностей деталей машин.

На рис.1 представлены типовые формы поверхностей отверстий: цилиндрическая, коническая, сферическая, винтовая. Получение представленных форм поверхностей отверстий может быть достигнуто за счет кинематики движения и формы режущей кромки инструмента.

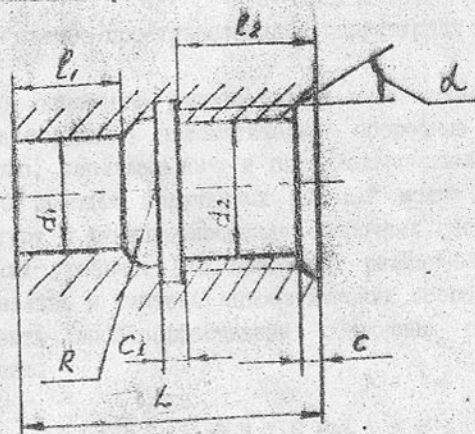


Рис.1. Наиболее типичные поверхности отверстий

При разработке структурно-логической модели процессов формообразования поверхностей при обработке ступенчатых отверстий осевым комбинированным инструментом (КИ) был положен принцип генерации образующей и направляющей во времени, изложенный в работах [1], [2], [3].

Наиболее распространенные методы формообразования отверстий представлены в Табл.1.

Данные способы формообразования могут быть описаны следующими логическими выражениями [2]:

$$F_1(t) = \bigwedge_{v=1}^r \bigwedge_{t=1}^p (dl_v \times dl_t);$$

$$F_2(t) = \bigvee_{v=1}^r (dl_v \times \bigwedge_{t=1}^p dl_t);$$

$$F_3(t) = \bigvee_{v=1}^r \bigwedge_{t=1}^p (dl_v \times dl_t);$$

$$F_4(t) = \bigwedge_{v=1}^r (dl_v \times \bigvee_{t=1}^p dl_t).$$

где r - количество точек в v -м направлении;

p - количество точек в t -м направлении;

$\wedge$ - логический символ конъюнкции, параллельного воздействия;

$\vee$ - логический символ дизъюнкции, последовательного воздействия.

Применение осевого комбинированного инструмента позволяет получить на различных ступенях отверстия поверхности любым из вышеперечисленных способов.

Помимо этого процесс резания зависит от схемы резания КИ, иными словами, последовательности взаимодействия каждой ступени КИ с каждой ступенью отверстия. Краткая характеристика схем резания и область их применения представлена в Табл.2.

Основываясь на некоторых положениях теории множеств, количество ступеней отверстия, обрабатываемого КИ, можно представить как множество элементов размерности n :

$$U_1 = \{U_{11}, U_{12}, \dots, U_{1k}, \dots, U_{1n}\},$$

где n - число ступеней инструмента.

Поверхность, получаемая при обработке КИ одной ступени отверстия, является отображением множества $F(t)$:

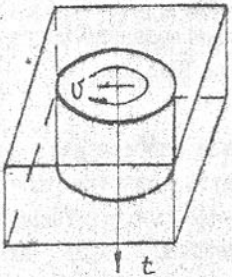
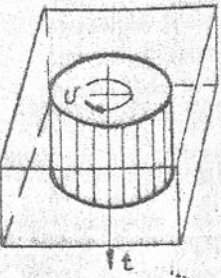
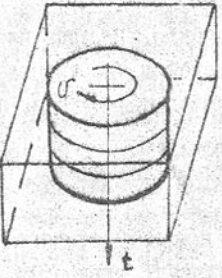
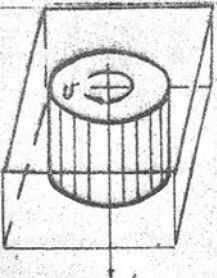
$$f: F_{1u_{1k}}(t) = U_{1k};$$

$$F_{1u} = F_{1u_{1k}}(t) \wedge F_{2u_{1k}}(t) \wedge F_{3u_{1k}}(t) \wedge F_{4u_{1k}}(t).$$

Отверстия, обрабатываемые n -ступенчатым КИ, представлены как объединения отдельных ступенчатых отверстий:

Таблица I

Процессы формообразования поверхностей отверстий.

Схема процесса формообразования	характеристика процесса
	Непрерывная - поверхность возникает непрерывно в двух измерениях. (Сверление, зенкерование, развертывание, протягивание)
	Единовременно прерывистая - поверхность возникает одновременно в одном измерении и прерывисто в другом. (Фрезерование по контуру)
	Единовременно-непрерывная - поверхность возникает одновременно в одном измерении и непрерывно в другом. (Нарезание резьбы резцом)
	Непрерывно-прерывистая - поверхность возникает непрерывно в одном измерении и прерывисто в другом.

$$U_1 = U_{11} \cup U_{12} \cup \dots \cup U_{1k} \dots \cup U_{1n} = \bigcup_{k=1}^n U_{1k}.$$

Основываясь на характеристиках схем резания, приведенных в Табл.2, вышеприведенными соображениями и используя логические отношения [4] структурно-логическую модель процессов формообразования ступенчатых отверстий осевым комбинированным инструментом можно представить в виде:

1 параллельная схема резания

$$F_1(t) = \bigwedge_{k=1}^n [F_{1u_{1k}}(t)] \zeta_{1k}, \quad (1)$$

где ζ_{1k} - номер ступени КИ, взаимодействующей со ступенью отверстия.

2 последовательная схема резания

$$F_1(t) = \bigvee_{k=1}^n [F_{1u_{1k}}(t)] \zeta_{1k}, \quad (2)$$

3 комбинированная схема резания

$$F_1(t) = \bigwedge_{k=1}^n \bigvee_{l=1}^3 [F_{1u_{1k}}(t)] \zeta_{1k}. \quad (3)$$

Необходимо отметить, что структурно-логическая модель комбинированной схемы резания (3) является частным и наиболее применяемым методом.

Установлено, что применение КИ на ТОНД позволяет уменьшить или число технологических роторов, или количество позиций технологической машины. Поэтому возникает необходимость в составлении модели процессов формообразования поверхности применительно к технологической системе в целом.

Исходя из системного подхода к процессам формообразования на технологических системах непрерывного действия установлено, что их применение позволяет параллельно обрабатывать m деталей. Количество которых зависит от количества позиций технологической машины, выполняющей данную операцию. Структурно-логическую модель процессов формообразования на ТОНД можно представить в виде:

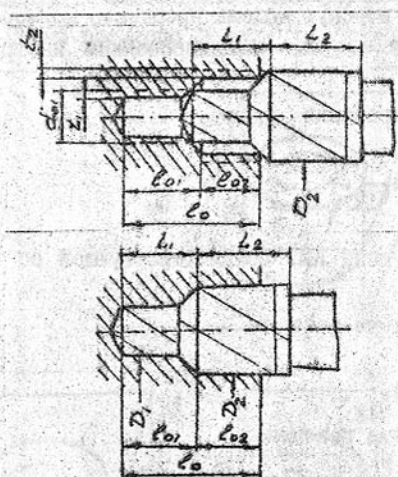
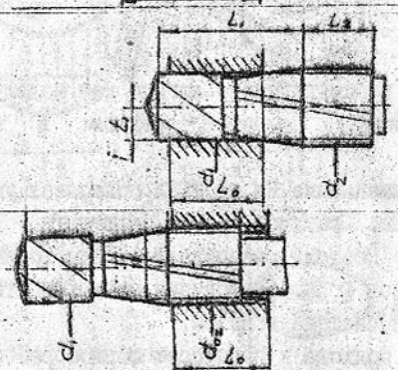
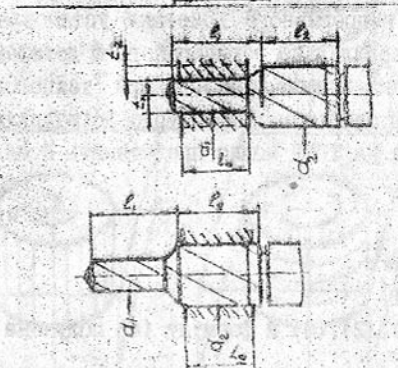
$$F_j(t) = \bigwedge_{j=1}^m F_\phi, \quad (4)$$

где $F_\phi = F_1^{\wedge}(t), F_1^{\vee}(t), F_1^{\wedge\vee}(t)$.

Объединив формулы (1), (2), (3) и формулу (4) получена оконча-

Таблица 2

Схема резания осевого комбинированного инструмента.

Схема резания КИ	характеристика схем рез.
	Параллельная схема резания обеспечивает максимальную производительность ТС, так как машинное время обработки одной ступени перекрывается временем обработки другой. Ограничения: одинаковая длина ступеней. Недостатки: высокая концентрация сил резания, ведущая к снижению точности обработки.
	Последовательная схема резания. Совмещение операций невозможно из-за несовместимости режимов их работы (сверление и нарезание резьбы, сверление и развертывание)
	Комбинированная схема резания. Длина ступеней различная. Для уменьшения сил резания одновременно обрабатывают не более двух ступеней. Производительность ТС увеличивается за счет сокращения вспомогательного времени.

Объединив формулы (1), (2), (3) и формулу (4) получена окончательная модель процессов формообразования ступенчатых отверстий осевым комбинированным инструментом на технологических системах непрерывного действия:

1 параллельная схема резания

$$F_1 = \sum_{i=1}^m (\sum_{k=1}^n [F_{1i,k}(t)] \zeta_{1k}^*);$$

2 последовательная схема резания

$$F_1 = \sum_{i=1}^m (\sum_{k=1}^n [F_{1i,k}(t)] \zeta_{1k}^*);$$

3 комбинированная схема резания

$$F_1 = \sum_{i=1}^m (\sum_{k=1}^n \zeta_{1k}^* \dots \zeta_{1k}^* = 2 \sum_{k=1}^n [F_{1i,k}(t)] \zeta_{1k}^*).$$

Структурно логический анализ процесса формообразования на ТСНД, оснащенных осевым комбинированным инструментом показал, что их эффективность можно повысить за счет выбора оптимальной схемы резания и конструкции инструмента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коногалов Е.Г. Основы новых способов металлообработки - Минск. Высш. школа, 1961. - 279с.
2. Михайлов А.Н. Тернюк Н.З. Общая методика синтеза поточно-пространственных технологических систем // Научные достижения и опыт отраслей машиностроения - народному хозяйству: Республиканская научно-технологическая конференция - г.Совастополь, ПЭТ-8.25.
3. Михайлов А.Н. Разработка методов проектирования высокоэффективных пространственных технологических систем. Автореф. докт. диссер. Киев, 1992. - 34с.
4. Математический энциклопедический словарь. - М.: Советская энциклопедия, 1988. - 847с.

Сопилкин Г.В., Ошовская Е.В., Руденко Р.В., Нижник А.В.

В Донецком государственном техническом университете разработана новая конструкция предохранительно-демпфирующей муфты. В настоящее время известны муфты, содержащие две полумуфты с выступами, соединенные посредством расположенных между ними гидроцилиндров /1,2/. Недостатками муфт является жесткость соединения полумуфт из-за отсутствия демпфирующих устройств и низкая надежность.

Целью данной работы является устранение указанных недостатков за счет установки демпфирующих элементов, что обеспечивает повышение надежности муфты.

Муфта содержит (рис.1) полумуфту 1 с выступами 2 и полумуфту 3 с выступами 4, соединенные посредством расположенных между ними гидроцилиндров первой группы 5 со штоками 6, гидроцилиндров второй группы 7 со штоками 8 и демпфирующих элементов в виде демпферных емкостей 9 и 10. Ползуны 11 и 12 смонтированы в направляющих 13 и 14 и закреплены соответственно на штоках 6 и 8.

Сдвоенный предохранительный клапан 15 (рис.2) расположен в центре полумуфты 3 и имеет первую рабочую полость 16, вторую рабочую полость 17, первую сливную полость 18 и вторую сливную полость 19. Каждый гидроцилиндр первой группы имеет поршневую полость 20 и полость 21, а гидроцилиндр второй группы - соответственно полости 22 и 23. Первая рабочая полость 16 сдвоенного предохранительного клапана 15 соединена с поршневыми полостями 20 гидроцилиндров первой группы, вторая рабочая полость 17 - с поршневыми полостями 22 гидроцилиндров второй группы, первая сливная полость 18 клапана 15 соединена со штоковыми полостями 23, а вторая сливная полость 19 - с полостями 21.

Штоковые полости цилиндров 5 и 7 соединены со сливом запорными вентилями 24.

При пуске машины момент посредством выступов 2 сообщается ползунам 11, закрепленным на штоках гидроцилиндров 5. Так как гидроцилиндры 5 гидравлически соединены между собой, то ползу-

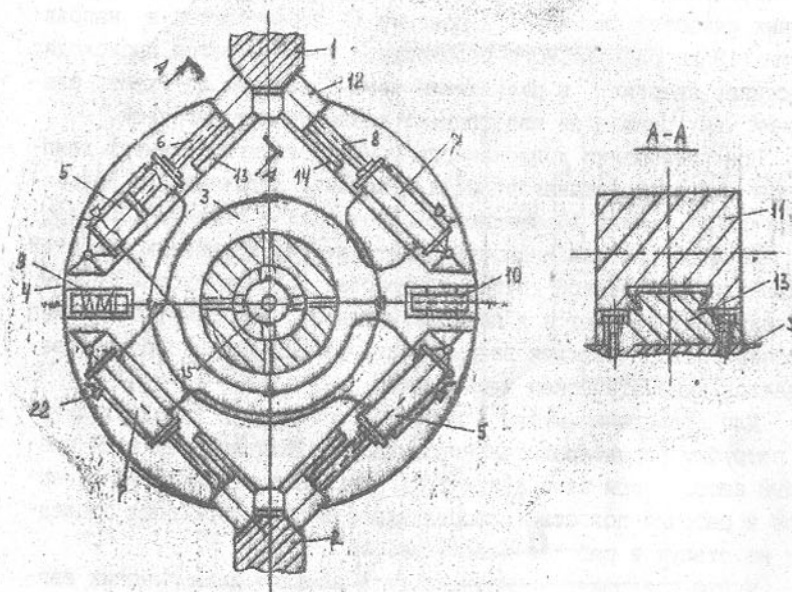


Рис.1. Конструктивная схема муфты

ны 11 перемещаются в направляющих 13, пока усилия на штоках гидроцилиндров 5 не выравниваются. Упругий элемент демпферных емкостей сжимается до установления равновесного состояния.

В режиме установившегося движения машины упругий элемент демпферных емкостей и ползуны 11 устанавливаются в определенном положении. В случае ударной нагрузки упругий элемент демпферных емкостей сжимается и ползуны 11 перемещаются в направляющих 13 до равновесного положения. Таким образом происходит рассеяние энергии, в результате чего колебания гаснут, благодаря чему снижается коэффициент динамических нагрузок.

При превышении допускаемого момента упругий элемент демпферных емкостей устанавливается в крайнее положение, а предохранительный клапан 15 соединяет рабочую 16 и сливную 18 полости. При этом рабочая жидкость перетекает из поршневых полостей гидроцилиндров первой группы в штоковые полости второй группы, и ползуны 12 упираются в паз полумуфты 3, и полумуфта 1 может свободно поворачиваться вокруг полумуфты 3. Таким образом разрывается кинематическая цепь машины.

Для приведения муфты в рабочее состояние к наполнительному патрубку предохранительного клапана 15 подсоединяется масляный насос, при этом вентили 24 открываются. Масло закачивается в рабочие полости гидроцилиндров до тех пор, пока последние не останутся в рабочем положении.

Муфта позволяет компенсировать влияние динамических нагрузок, что обеспечивает повышение надежности ее работы и оборудования, в кинематической цепи которого находится муфта. Конструктивные особенности муфты дают возможность размыкать кинематическую цепь машины, что предохраняет машину от предельных нагрузок, исключая аварийные поломки. Таким образом, предлагаемая муфта работает как устройство для передачи вращения, компенсации динамических нагрузок и предохранения механизмов от перегрузок.

Эксплуатация предохранительной муфты показала, что длительное влияние на ее работоспособность оказывает износ деталей поршневого узла и узла штокового уплотнения. Износ обуславливает возрастание наружных утечек жидкости и перетечек ее между полостями, а это в свою очередь приводит к снижению КПД муфты.

С целью определения влияния основных конструктивных и

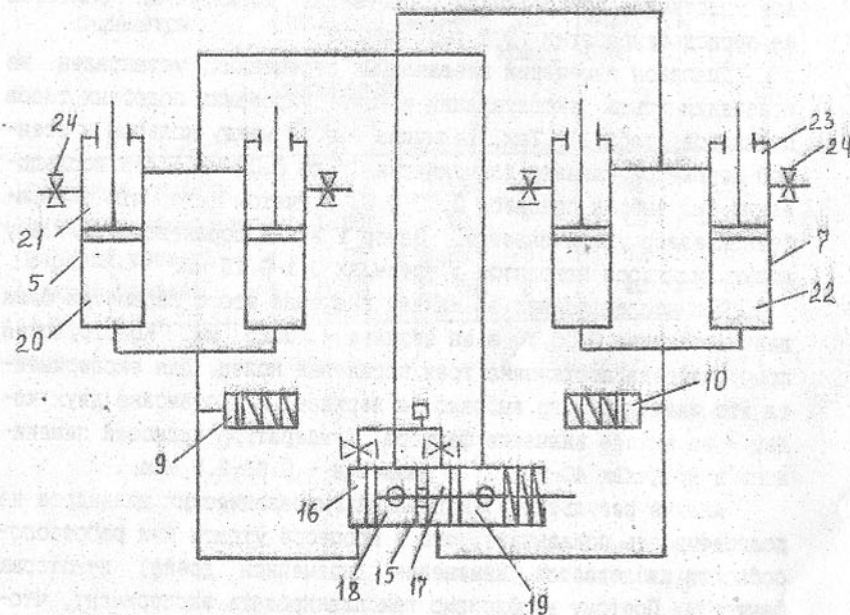


Рис.2. Гидравлическая схема

эксплуатационных факторов на работоспособность гидроцилиндров был проведен факторный эксперимент. В качестве независимых переменных выбраны следующие факторы: величина бокового зазора между кольцом и стенкой поршневой канавки, зазор в гайке поршневого кольца, количество поршневых колец, температура масла в системе, величина давления. Зависимая переменная выражает величину утечек жидкости между полостями цилиндра через поршневое уплотнение при различных сочетаниях исследуемых факторов за период приработки (200 тыс. циклов).

Диапазон изменений независимых переменных установлен на основании опыта эксплуатации и конструирования подобных типов цилиндров (табл.1). Так, величина зазора между кольцом и стенкой поршневой канавки допускается ТУ до 0.03 мм. Для исследований был выбран диапазон 0.03-0.05 с учетом того, что с нарабаткой зазор увеличивается. Зазор в гайке поршневого кольца у новых цилиндров находится в пределах 0.1-0.15 мм.

При исследованиях за нижнее значение этого параметра была взята величина 0.05, а за верхнее - 0.25 мм. Конструкцией предусмотрена установка трех поршневых колец. Для эксперимента это значение было выбрано за верхнее, а установка двух колец - за нижнее значение фактора. Температура жидкости изменялась в пределах 40-60 °С, а давление - 0.80-2.5 МПа.

Анализ результатов испытаний гидравлических цилиндров на долговечность показывает, что в процессе утраты ими работоспособности наблюдается изменение (временной дрейф) некоторых факторов. Поэтому необходимо так планировать эксперимент, чтобы оценить влияние управляемых факторов на выходной параметр независимо от дрейфа.

Описывая процессы в условиях дрейфа, требуется решить две задачи: 1) определить порядок дрейфа; 2) построить план для управляемых факторов, ортогональный к дрейфу, и описать как дрейф, так и зависимости параметра оптимизации от управляемых факторов.

Для построения плана в условиях дрейфа в качестве ортогональной системы функций используем полиномы Чебышева [3,4]. При этом функция дрейфа p_t представляется в виде

$$p_t = \alpha_0 P_0(t_i) + \alpha_1 P_1(t_i) + \dots + \alpha_N P_N(t_i),$$

где $P_N(t_i)$ - ортогональные полиномы Чебышева, определенные для $N = T/\Delta t$ моментов времени, отстоящих друг от друга на интервал

Таблица 1

Значения исследуемых параметров

Параметры	Зазор, мм		Количество поршневых колец	Температура рабочей жидкости, °С	Давление, МПа
	между кольцом и стенкой поршневой канавки	в гайке			
Основной уровень	0.04	0.15	-	50	1.65
Интервал измерения	0.01	0.10	-	10	0.85
Верхний уровень	0.05	0.25	3	60	2.5
Нижний уровень	0.03	0.05	2	40	0.8

Δt ; T - время испытаний.

Интерполяционный ряд Чебышева $\alpha_0 P_0(x_1) + \alpha_1 P_1(x_1) + \dots + \alpha_\lambda P_\lambda(x_1) + \dots$ - это ряд, обладающий замечательным свойством: давать посредством суммы λ первых членов приближенное представление интерполируемой функции, причем эта часть ряда удовлетворяет требованию наименьших квадратов. Для функции дрейфа порядок последнего значимого полинома - порядок дрейфа.

В результате реализации плана получается модель вида

$$y = \sum_{\lambda=0}^L \alpha_\lambda P_\lambda(t) + \sum_{i=1}^n b_i x_i.$$

Здесь первый член характеризует смещение поверхности во времени, а второй - ее наклон, α и b_i определяются по формулам:

$$\alpha_\lambda = \frac{\sum_{i=1}^N y_i P_{\lambda i}}{\sum_{i=1}^N P_{\lambda i}^2}, \quad b_i = \frac{\sum_{i=1}^N y_i x_{i i}}{\sum_{i=1}^N x_{i i}^2}.$$

В составленном плане эксперимента полиномы Чебышева представлены линейной комбинацией столбцов матрицы Z^n .

Испытания проводили на специальном стенде, который обеспечивал надежный контроль и точное регулирование выбранных параметров. Используемая рабочая жидкость - масло индустриальное 20.

Утечки жидкости измерялись при постановке штока "на упор" при трех различных положениях поршня с последующим определением их среднего значения. Температура жидкости при этом была $t=50^\circ\text{C}$, а давление в системе стенда - 2,5 МПа. Оценка утечек в каждом опыте производилась по результатам испытаний двух гидрокпроводов. В качестве плана выбрана полуреплика типа 2^{5-1} (табл. 2).

Принятые обозначения: Z_1-Z_4 - столбцы линейного дрейфа; X_1-X_5 - кодовые обозначения соответствующих факторов (зазора между кольцом и стенкой канавки, зазора в замке, числа поршневых колец, температуры рабочей жидкости и давления в системе); $X_1X_4, X_2X_3, X_1X_5, X_3X_4, X_4X_5$ - кодовые обозначения парных взаимодействий (соответственно зазора в сочленении кольцо-канавка и температуры рабочей жидкости, зазора в замке и количества поршневых колец, зазора в сочленении кольцо-канавка и давления в системе, количества поршневых колец с температурой и, наклон, факторов температуры и давления); P_0, P_1 - полиномы Чебы-

Таблица 2

Матрица планирования и результаты экспериментов

Кодовые обозначения опыты	Кодовые обозначения дрейфа	Кодовые обозначения факторов и их взаимодействия	Полиномы Чебышева		Утечки, см ³ /мин
			P_0	P_1	
1	Z_1	X_1	1	-15	211
2	Z_1	X_2	1	-13	200
3	Z_1	X_3	1	-11	92
4	Z_1	X_4	1	-9	95
5	Z_1	X_5	1	-7	109
6	Z_2	X_1	1	-5	184
7	Z_2	X_2	1	-3	148
8	Z_2	X_3	1	-1	184
9	Z_2	X_4	1	1	163
10	Z_2	X_5	1	3	161
11	Z_3	X_1	1	5	124
12	Z_3	X_2	1	7	91
13	Z_3	X_3	1	9	11
14	Z_3	X_4	1	11	107
15	Z_3	X_5	1	13	184
16	Z_4	X_1	1	15	226

шева.

Здесь

$$\alpha_0 = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} = 2370/16 = 148.12,$$

$$\alpha_1 = \frac{\sum_{i=1}^N y_i P_{1i}}{\sum_{i=1}^N P_{1i}} = -342/1360 = -0.25.$$

В результате статистической обработки экспериментальных данных получена следующая зависимость для выражения утечек рабочей жидкости (с учетом временного дрейфа факторов за период 300 тыс. циклов):

$$y = 148.12 - 0.25P_1 + 13.25X_1 - 5X_2 + 3.75X_3 + 15.5X_4 + 34X_5 + 9.37X_1X_4 - 7.62X_2X_3 + 9.37X_1X_5 + 7.87X_3X_4 + 2.62X_4X_5.$$

Производим проверку адекватности полученного уравнения. Необходимые вычисления приведены в табл. 3.

Проверку условий однозначности дисперсий зависимой переменной производим, сравнивая вычисленное и табличное значение критерия Кохрена:

$$F_{\text{эксп}} = 0.1162, F_{\text{табл}}(\alpha=0.05) = 0.7341,$$

$$F_{\text{эксп}} < F_{\text{табл}}.$$

Гипотеза об однородности дисперсий верна. Для проверки адекватности модели вычисляем значения критерия Фишера:

$$S_{\text{ад}} = 5005.96, S_{\text{воспр}} = 726.88,$$

$$F_{\text{эксп}} = S_{\text{ад}}/S_{\text{воспр}} = 5005.96/726.88 = 6.9, F_{\text{табл}}(\alpha=0.01) = 8.8,$$

$$F_{\text{эксп}} < F_{\text{табл}}.$$

Модель адекватна.

Находим дисперсию коэффициентов регрессии

$$S\{b_i\} = 363.44/16 = 22.71.$$

Вычисляем доверительный интервал для коэффициентов

$$\Delta b_i = \pm 1.364 * 4.76 = \pm 6.38.$$

Таким образом, значимыми являются факторы X_1 , X_4 и X_5 , а также взаимодействия X_1X_4 , X_1X_5 , X_2X_3 , X_3X_4 :

$$S\{d_i\} = \frac{S\{y\}}{\sum_{i=1}^N P_{1i}} = 363.44/1360 = 0.2672,$$

Таблица 3

Статистический анализ модели

Номер опыта	y	y_2	$\bar{y}$	Δy	$(\Delta y)^2$	$\bar{y}$	$y - \bar{y}$	$(y - \bar{y})^2$	$(y - \bar{y})^3$
1	236	186	211	25	625	226.98	15.98	225.36	510.72
2	223	177	200	23	529	195.74	4.26	18.15	36.30
3	103	81	92	11	121	81.76	10.24	104.86	209.72
4	107	83	95	12	144	110.48	15.48	239.63	479.26
5	127	91	109	16	324	87.76	21.24	451.14	902.28
6	203	165	184	19	361	184.46	0.46	0.23	0.46
7	164	132	148	16	256	153.5	5.5	30.25	30.50
8	208	160	184	24	576	160.26	23.74	563.59	1127.18
9	183	143	163	20	400	166.76	3.76	14.14	28.28
10	179	143	161	18	324	175.48	14.48	209.67	419.34
11	139	109	124	15	225	143.5	19.5	380.85	766.30
12	100	82	91	9	81	92.26	1.26	1.59	3.18
13	128	94	111	17	289	112.98	1.93	3.92	8.94
14	127	87	107	20	400	99.74	7.26	52.71	105.42
15	186	142	164	22	484	150.79	13.24	175.30	350.60
16	252	200	226	26	676	227.48	1.48	2.19	4.36
					5815			2502.98	5005.96

$$S(\alpha) = 0.52, \Delta\alpha = \pm 1.34 * 0.52 = \pm 0.69.$$

Дрейф незначим.

Анализируя данное уравнение, видим, что наибольшее влияние на величину утечек жидкости между полостями цилиндра оказывает фактор давления. Значительное влияние оказывает фактор температуры, величина зазора между поршневым кольцом и стенкой канавки, а также взаимодействия факторов: зазора между кольцом и стенкой канавки с температурой и давлением; числа поршневых колец с температурой и зазором в замке.

Кроме полученных данных по утечке жидкости гидроцилиндров, особое внимание было уделено вопросу оптимизации габаритных размеров: диаметра, толщины стенки цилиндров и соединительных элементов, что обеспечило минимальные размеры муфты в целом, повысив ее безотказность и точность срабатывания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.с. N325432, кл. F16D 1/00; 1970. СССР.
2. А.с. N706602, кл. F16D 3/52, 1978. СССР.
3. Численные методы в инженерных исследованиях/В.Е. Краскевич, К.Х. Зеленский, В.И. Гречко. - К.: Вища шк., 1986. - 263с.
4. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей/В.З. Бродский, Л.И. Бродский, Г.И. Голикова и др. - М.: Металлургия, 1982. - 564 с.

МОДЕЛИ ЭКСПЕРТНО-ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

Сопилкин Г.В., Ченцов Н.А., Ошовская Е.В.

В Донецком государственном техническом университете разработаны методические материалы (алгоритмы, методики и ФМ) по внедрению в отраслях народного хозяйства экспертно-диагностической системы технического обслуживания и ремонта оборудования. Система предназначена для осуществления экспертизы технического состояния оборудования на стадии эксплуатации путем поиска данных, обеспечивающих логические выводы о необходимости выполнения ремонта, обслуживания и совершенствования (реконструкции) машин и агрегатов с минимальными затратами.

Экспертно-диагностическая система технического обслуживания и ремонта оборудования рассматривается как компьютерная система, которая основана на сборке и обработке статистических данных об отказах машин и механизмов, отдельных узлов и деталей. Данная система отличается от ранее известных тем, что она основана на последовательной, логической оценке состояния машин и механизмов с учетом материальных, финансовых и трудовых ресурсов ремонтных служб предприятия. Система включает коллектив подготовленных специалистов, совокупность технических средств сбора, переработки информации и предназначенных для решения на основе специально сконструированных алгоритмов задач принятия решений ремонта, обслуживания конкретных машин, механизмов или оборудования цеха (прокатного стана, литейного агрегата и др.).

Процесс принятия решения представлен четырьмя уровнями: сбор и анализ статистических данных об отказах; сбор и анализ данных диагностических измерений приборами состояния машин; прогнозирование ситуации по определению: сроков и объемов ремонтно-профилактических работ, потребности для их выполнения трудовых, материальных и финансовых ресурсов; принятие решений. Каждый из уровней представляет самостоятельную локальную систему. На входе таких систем поступает предварительно обработанная информация, обеспечивающая принятие решений (на каждом из уровней), либо промежуточная информация, используемая следующими уровнями. Системы первого и второго уровней относятся к вероятностным, а третьего и четвертого - к логическим,

использующим статистические и эвристические методы.

В состав локальной системы первого уровня включены следующие задачи: формирование справочников машин и механизмов, видов и причин отказов; алгоритм расчета показателей надежности; формирование по конкретным машинам состава быстроизнашиваемых узлов и деталей; прогнозирование изменения технического состояния узлов, деталей; экспертная оценка надежности машин и механизмов с определением объема ремонтно-профилактических работ и трудовых ресурсов для их реализации; формирование портфеля запасных частей.

Внедрение средств диагностирования связано с решением ряда теоретических и практических задач второго уровня: выявлением "узких мест" машин на базе показателей надежности; выбором средств и параметров диагностирования; составлением диагностической модели; прогнозированием ресурсов деталей, узлов машин и оборудования цеха; формированием алгоритмов и программ организации диагностических работ; экспертной оценкой состояния машин и агрегатов; расчетом объемов ремонтно-профилактических работ.

Таким образом, решение задач первых двух уровней обеспечивает экспертов информацией для технико-экономического анализа конкретных ситуаций. Техничко-экономический анализ проводится по функциональному принципу, включая функции учета, анализа, нормирования, планирования, прогнозирования и регулирования.

По каждой машине (во времени) формируется информация учета: число отказов по деталям, причинам отказов, видам ремонта, времени устранения отказа, видам простоя оборудования, трудоемкости работ; числу точек диагностирования, средств и времени диагностирования, по изменению параметров машины и ее элементов; затратам на ремонт и содержание. Кроме того, ведется учет программы производства, наличия финансовых, материальных и трудовых ресурсов ремонтных служб.

Учетные данные составляют базу функции анализа, включающую данные о наработке на отказ машин (узлов и деталей); времени восстановления, коэффициенты готовности, коэффициенты вынужденного простоя, интенсивности отказов, времени простоя цеха из-за машины, времени диагностирования, изменении параметров состояния и др. Использование показателей надежности и данных о текущем состоянии машин дает возможность нормировать, технически обосновывать показатели потребности в запчастях, чис-

ленность обслуживающего и ремонтного персонала, объемы диагностических и ремонтных работ и др.

По рассчитанным нормам определяются показатели функции планирования: оптимальные сроки остановки оборудования на ремонт и профилактику; сроки изготовления и замены деталей и узлов; оптимальная численность ремонтного персонала; оптимальные затраты на ремонт и содержание оборудования.

Особо выделяется функция прогнозирования, для реализации которой используются данные о ходе и перспективах развития производства, реальная ситуация о состоянии оборудования, финансовом положении ремонтных служб, предприятия в целом. Функции учета, анализа, нормирования, планирования и прогнозирования через контроль и регулирование замыкаются на объект управления - машины, механизмы.

Экспертно-диагностическая система технического обслуживания и ремонта оборудования включает информационное, математическое и организационное обеспечение.

Первый и второй уровни являются основой информационного обеспечения системы, включая базы данных постоянной и переменной информации. Постоянная информация включает: структуру и состав машин и механизмов, а именно, специальные классификаторы машин (узлов), видов и причин отказов, точек и режимов диагностирования; множество допустимых оценок ситуации по состоянию машин и ее материально-технической обеспеченности для проведения ТО и Р; справочник ситуаций, характеризующих техническое состояние машин и механизмов. Переменная информация отражает текущее состояние объектов, т.е. информация позволяет эксперту сказать: будет ли в ближайшее время оборудование работоспособным и имеются ли средства для его поддержания в таком состоянии с минимальными затратами. Постоянная и переменная информация обеспечивает формирование множества допустимых оценок ситуации по состоянию машин и механизмов, а также множества допустимых оценок, из которых осуществляют выбор эксперты.

Экспертная система включает большое количество алгоритмов, целевое объединение которых в вычислительные и диалоговые модели позволяет находить управляющие решения. Вместе с тем для этой системы характерны и описания процессов поиска решений, представленные в виде некоторых множеств утверждений. Вся информация, вернее ее представление, базируется на понятии фор-

мальной системы, это позволяет построить единое представление разнотипной информации, согласованное в рамках единого формализма. Учитывая то, что информация, характеризующая область управления, может обрабатываться аналитическими моделями, описываемыми методами вычислительной математики. Экспертные модели решают задачи выработки и принятия управляющих решений. Тогда как, диалоговые модели обеспечивают решение задач человеко-машинного взаимодействия при управлении, обучении и проектировании. Рассмотрим некоторые из них.

Срок остановки машины на ремонт определяется коэффициентом технического состояния $K_{т.с.}$, характеризующим изменение состояния элемента машины в зависимости от его ресурсов T , скорости истощения ресурса V и времени эксплуатации t :

$$K_{т.с.} = T_0 / T_n \quad (1)$$

где T_0 - остаточный ресурс; T_n - назначенный ресурс.

Остаточный ресурс представляет собой разность назначенного и использованного ресурсов:

$$T_0 = T_n - T_i \quad (2)$$

где T_i - использованный ресурс.

Представив использованный ресурс как произведение скорости истощения ресурса V на фактически отработанное время (срок службы или наработку T_i), получим коэффициент технического состояния:

$$K_{т.с.} = (1 - VT_i) / T_n \quad (3)$$

Используя (3), можно определить момент времени, до исполнения которого необходим ремонт. Действительно, приравняв в формуле (3) $K_{т.с.}$ нулю, определим момент полного истощения объектом своего ресурса:

$$t_{ij} = T_j / V_j \quad (4)$$

где t_{ij} - время начала i -го ремонта машины, определяемое как прогнозируемый остаточный срок службы j -го элемента машины до ремонта; V_j - скорость истощения ресурса j -го элемента; T_j - запас ресурса j -го элемента.

Время начала i -го ремонта следует устанавливать по основным элементам машины, имеющим на момент оценки технического состояния машины наименьший ресурс и для которых $K_{т.с.}$ будет близок или равен минимальному значению. Останавливать машину на ремонт следует при одном и том же значении $K_{т.с.}$, так как ремонт при $K_{т.с.} < K_{т.с. \min}$ создавал бы аварийные ситуации, а преждевременная остановка машины на ремонт снижает ее экономи-

ческие и эксплуатационные показатели.

При определении периодичности ТО по остаточному ресурсу необходимо располагать данными по назначенным ресурсам машин до выполнения определенного вида ТО и данными по скорости истощения ресурса. Тогда,

$$T_0 = (\Delta A_{\text{доп}} - \Delta A_{\text{ф}}) / V, \quad (5)$$

где $\Delta A_{\text{доп}}$ - предельно допустимое отклонение диагностического параметра от его номинального значения; $\Delta A_{\text{ф}}$ - фактическое отклонение параметра от его номинального значения. Использование выражений (1)-(5) обеспечивает расчет объемов ТО и Р оборудования.

Важным элементом функционирования системы ТО и Р является расчет количества запасных частей. Разработана вероятностная модель расчета среднего расхода запасных частей:

$$N_{\text{ср}} = T_{\text{пл}} / T_{\text{ср}}, \quad (6)$$

где $T_{\text{ср}}$ - средняя наработка на отказ; $T_{\text{пл}}$ - плановое время работы оборудования.

Вероятности того, что не будет простоев из-за деталей данного типа в запасе, определяется выражением:

$$\alpha = \sum_{i=0}^{n_{\text{зч}}} (N_{\text{ср}} / i!) e^{-N_{\text{ср}}} \quad (7)$$

Задавшись α и зная величину $N_{\text{ср}}$, рассчитываем количество запасных частей по данной детали на планируемый период времени $T_{\text{пл}}$ по уравнению

$$n_{\text{зч}} = p N_{\text{ср}}, \quad (8) \quad 2 \quad 2$$

где p -полином, определяемый выражением $p = 1.215 + 0.025x_1 + 0.02x_2 + 0.0634x_1 - 0.06513x_2 - 0.02x_1$, где $x_1 = (2\alpha - 1.88) / 0.08$; $x_2 = (N_{\text{ср}} - 50) / 25$.

Пользуясь выражениями (6)-(8), с достаточной для практической деятельности точностью определяется количество запасных частей для конкретной детали (узла), наработка до отказа которой подчиняется закону Вейбулла.

Для решения задачи обоснования k и выбора объектов на проведение ТО и Р использована экспертная модель. Суть задачи в следующем. Имеется совокупность машин цеха, образующих множество A . Техническое состояние машин и технико-экономические ресурсы для их проведения определяются показателями $x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_m$. Необходимо из множества A выделить подмножество $B \subset A$ машин, требующих проведения ТО и Р. Модель реализуется следующим образом. В начале проводим сбор и обработку информации о

состоянии машин. По каждому показателю определяем функцию выбора, на основании которой проводим предварительный анализ машин. Вычисляем коэффициенты весомости. Коэффициенты значимости показателей рассчитываем по экспертным оценкам. Указанные показатели составляют обобщенное состояние машины и ресурсов, обеспечивающих проведение ТО и Р. Сравнивая показатели состояния машины со средневзвешенными, определяем и ранжируем машины, требующие принятия решений.

Функция выбора по каждому показателю определяется так:

$$(X_0)_j = \sum_{i=1}^N x_{ji}/N, \quad (9)$$

где $(X_0)_j$ - функция выбора по j -тому показателю; x_{ji} - значение j -го показателя i -той детали (машины); N - общее число деталей.

Коэффициент весомости рассчитываем:

$$a_i = x_{ji}/(X_0)_j. \quad (10)$$

Степень согласованности мнений экспертов определяем при помощи коэффициента конкордации:

$$W = 12 \sum_{i=1}^m [(r_i - 0.5A(m+1))^2 / (A^2(m^3-m))], \quad (11)$$

где m - число показателей; A - число экспертов; r_i - сумма рангов, полученных показателей от одного эксперта.

В качестве коэффициента значимости показателей принято значение среднего ранга

$$K_i = \sum_{i=1}^m r_i/m.$$

Обобщенную характеристику состояния машины определяем на основании коэффициентов значимости и весомости

$$B = a_1 K_1 + a_2 K_2 + \dots + a_j K_j, \quad (12)$$

а средневзвешенную по выражению

$$B_0 = \sum_{i=1}^N \beta_i / \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^m a_{ij}, \quad (13)$$

где N_1 - число деталей (узлов), отобранных после предварительного отбора.

Если $B_1 > B_0$, то машина требует принятия технического решения для повышения проведения ремонтных работ; если $B_1 < B_0$, то

необходимость принятия таких решений не требуется.

Таким образом, использование предложенного метода, основанного на оценке экспертов, дает возможность определить рациональный объем ремонтно-профилактических работ с учетом состояния каждого из объектов.

График ремонтно-профилактических работ представлен представлен в виде матрицы:

$$A = \|a_{ij}\|_{n,m}; \quad i=\overline{1,n}, \quad j=\overline{1,m},$$

где a_{ij} - трудоемкость работ по машине; n, m - число строк и столбцов, равных соответственно количеству машин и плановых ремонтов.

Качество графика оценивается колебаниями суммарной трудоемкости ремонта, которая вычисляется по формуле $T_i = \sum_{j=1}^m a_{ij}$.

Оптимален тот график, у которого колебания минимальны или не превышают допустимые значения. Следовательно, решается задача балансировки матрицы, суть ее в следующем. В матрице A с нулевыми и ненулевыми элементами необходимо переставить так ненулевые элементы внутри строки, чтобы разность между максимальной и минимальной суммой элементов столбцов была минимальна. При этом не должны нарушаться некоторые ограничения на расположение соседних ненулевых элементов каждой строки. Необходимо найти оптимальную матрицу A^* , для которой сумма элементов j -го столбца равна:

$$W(A^*) = \min_{A \in \Omega} [\max_{i=1, \dots, n} T_i(A) - \min_{i=1, \dots, n} T_i(A)], \quad i = \overline{1,m}. \quad (14)$$

Выражение (14) вычисляется для множества Ω матриц, удовлетворяющих условиям:

$$1 \leq j_1^i(A) \leq d_j; \quad t_i^H \leq j_{s+1}^i(A) - j_s^i(A) \leq t_i^B; \quad (15)$$

$$g_i \leq j_k^i(A) \leq m; \quad i = \overline{1,n}; \quad s = \overline{1, k-1},$$

где $j_s^i(A)$ - номер столбца, в котором расположен s -й ненулевой элемент i -й строки; d_j - номер последнего столбца, в котором может находиться первый ненулевой элемент i -той строки; g_i - номер первого столбца, в котором располагается последний ненулевой элемент i -й строки; t_i^B и t_i^H - максимальная и минимальная разности между номерами столбцов соседних ненулевых элементов i -й строки.

Величины t_i^B и t_i^H определяются как верхняя и нижняя границы наработки на отказ T_i .

Обозначим нижнюю α и верхнюю β границы $T_i(A)$, тогда вместо A^* можно записать A' , для которой

$$W'(A) = \min W^*(A) = \min[W^B(A) + W^H(A)], \quad (16)$$

где $W^B = \begin{cases} \max T_i(A) - \beta, & \text{если } \max T_i(A) > \beta, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$

$$W^H = \begin{cases} \alpha - \min T_i(A), & \text{если } \min T_i(A) < \alpha, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Наиболее распространенной задачей ТО и Р является задача оптимального распределения ресурсов ремонтных служб. Процесс ремонта охватывает ряд комплексов работ, каждый из которых содержит множество самых разнообразных операций, требующих для их выполнения большого количества различных видов ресурсов. В этих условиях возникает необходимость решения задачи планирования, заключающейся в рациональном распределении имеющихся ресурсов во времени при выполнении этих работ. Цель решения задачи заключается в распределении имеющихся ресурсов B_j ($j=1, m$) таким образом, чтобы за счет более рационального их использования общая продолжительность выполнения всех работ T_i ($i=1, n$) была бы минимальной, т.е. целевая функция имеет вид

$$T = \sum_{i,j} a_{ij} / \sum B_j \rightarrow \min, \quad (17)$$

где a_{ij} - трудоемкость i -й работы, выполняемой j -м ресурсом.

При распределении ресурсов приняты следующие ограничения:

$$b_{ij} \min \leq b_{ij} \leq b_{ij} \max, \quad (18)$$

где b_{ij} - значение ресурса j -го вида, используемого при выполнении i -й работы:

$$\sum_{i,j} b_{ij} \leq \sum B_j, \quad (19)$$

где b_{ij} - значения ресурса j -го вида, используемого при выполнении i -й работы в момент времени t .

Все работы разбиты на отдельные группы, характерными признаками для которых являются: 1) возможность выполнения работ одним видом ресурсов (одной ремонтной бригадой, одним краном и др.); 2) возможность выполнения работ параллельно во времени. Процесс распределения ресурсов для комплексов работ решен эвристическим методом с геометрической интерпретацией работ в виде прямоугольников S_{ij} , имеющих площадь равную $b_{ij} \cdot t_{ij}$. Общая трудоемкость работ каждой группы интерпретирована в виде полосы D , имеющей ширину B_j , а длину $T_{\min}$. Таким образом, задача сводится к тому, чтобы в области D плотно разместить оп-

ределенное число n прямоугольников, площади которых в основном не равны между собой, а сами они имеют различную форму.

Рассмотрим модель оптимизации длительности текущих и капитальных ремонтов за счет рациональной последовательности выполнения ручных и механизированных ремонтных операций. Модель предназначена для планирования ремонтных работ оборудования цехов, включающих более 100 машин, на каждой из которых выполняется от 20 до 50 операций, кранов - не более 3, ремонтных бригад - от 8 до 12.

Оптимизация продолжительности ремонтов за счет рациональной последовательности выполнения ручных и механизированных ремонтных операций сводится к следующему: при фиксированном количестве ремонтируемых машин, кранов и ремонтников необходимо составить график работ таким образом, чтобы длительность ремонта была минимальной.

Исходные данные

$$R_i = (t_{1i}, t_{1i}; t_{2i}, t_{2i}; \dots; t_{l_i i}, t_{l_i i}),$$

где t - продолжительность работы крана на j -том этапе ремонта i -й машины; t_{ji} - продолжительность ручного ремонта (без крана) на j -том этапе ремонта i -й машины после работы крана на этой машине; l_i - число этапов ремонта i -й машины.

Обозначим: m - количество одновременно ремонтируемых машин; n - количество машин, которые необходимо отремонтировать; k - количество ремонтных кранов или других грузоподъемных средств.

Введем неизвестные: T_{ji} - время начала работы s - или p -го крана на j -том этапе ремонта i -й машины (если s -й кран не участвует в j -том этапе ремонта i -й машины, то T_{ji} полагаем равным $-\infty$).

Тогда, функция цели будет иметь вид

$$T_{1i} + t_{1i} + t_{1i} \leq \Phi, \quad i=\overline{1, n}; s=\overline{1, k}, \quad (20)$$

где Φ - время окончания ремонта.

Ограничения, накладываемые на модель, можно записать в следующем виде:

$$T_{jis} + t_{ji} + t_{ji} \leq T_{j+1,p}, \quad i=\overline{1, n}; j=\overline{1, l_i-1}; p=\overline{1, k}, \quad (21)$$

$$T_{jis} + T_{j+1,p} < 0; \quad i=\overline{1, n}; j=\overline{1, l_i}; s, p=\overline{1, k}; s \neq p, \quad (22)$$

Ограничение (21) показывает, как соотносятся времена начала последующего и предыдущего этапов ремонта машины и что одновременно в ремонте одной машины может участвовать только один кран, а ограничение (22) - что один кран в каждый момент вре-

мени участвует в ремонте только одной машины. Краны имеют ограниченную грузоподъемность и может случиться, что s -тый кран не может работать на j -том этапе ремонта i -той машины. В таком случае на модель накладываются ограничения вида

$$T_{ji} = -\infty. \quad (23)$$

Если s -тый кран не имеет доступа к i -той машине, то модель должна удовлетворять условиям вида

$$T_{ji} = -\infty, j=1, l_i. \quad (24)$$

Кроме того, принимаем предпочтительность выполнения нескольких операций подряд на одном рабочем месте одним и тем же краном. Каждой операции становится в соответствие "вес" - время, необходимое для ее выполнения.

Предлагаемые модели дают возможность решать проблемные задачи: анализ технического состояния машин; выбора и обоснования сроков проведения ТО и Р; расчета необходимого количества запасных частей; оптимизации длительности текущих и капитальных ремонтов; проблемы развития ремонтной базы предприятия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Организация технического обслуживания металлургического оборудования/Седуш В.Я., Сопилкин Г.В., Вдовин В.З. и др. - К.: Техника, 1986. - 124 с.
2. Сопилкин Г.В., Седуш В.Я., Мартынов Ю.М. и др. Алгоритм оптимизации графиков профилактических работ//Металлургическая и горнорудная промышленность. - 1988, №1. - с.63-64.

РОБОТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН В МАШИНОСТРОЕНИИ

Стойко В.П., Кучер В.С., Кучер Т.В.

Технологические процессы изготовления деталей машин в машиностроении укрупненно можно разделить на две группы. К первой относятся те технологии, которые предусматривают изготовление новых деталей машин из новых заготовок механической обработкой с последующей или промежуточной термической обработкой, покрытиями и т.д. Ко второй группе относятся технологии, в структуре которых присутствует восстановление изношенных деталей машин, т.е. заготовкой в этом случае служит изношенная деталь машины и первым технологическим процессом является восстановление геометрической формы детали с необходимыми припусками на последующие виды обработки, если они необходимы. Восстановление производят наплавкой, покрытиями, электрошлаковой технологией, электроконтактным методом и другими видами обработки. Такие технологические процессы являются перспективными, так как они позволяют во многих случаях получить детали машин с повышенными служебными свойствами, т.е. упрочнить их. Так получают биметаллические детали машин, композиционные конструкции и даже полиметаллические детали, соединенные в единое целое из разнородных материалов, имеющих определенные объемы, слои и поверхности, например, из износостойких материалов и сплавов и объемы из конструкционных материалов. Такие детали наилучшим образом отвечают служебным нагрузкам. Нередко новые заготовки проектируют с учетом применения технологического процесса, создающего упрочненные рабочие поверхности и объемы. В этих условиях актуальным является организация в структуре машиностроительного производства технологического процесса изготовления заготовок, отвечающих современным требованиям и являющихся базой для обработки деталей с повышенными служебными характеристиками.

Получил распространение технологический процесс производства концевой инструмента - крупных токарных центров, концевых фрез, зубьев, зубцов и т.д. с применением электрошлаковой технологии. Процесс позволяет создать биметаллический инструмент, рабочая часть которого по форме изделия отливается электрошлаковым способом из износостойкого материала с припусками на механическую обработку и методом электрошлаковой сварки надежно соединяется с хвостовиком. Реализация этого процесса требует сложных манипуляций с инструментом, которые лучше всего выполнить с помощью промышленного робота, обеспечивающего высокую точность позиционирования, высокую

производительность и полную автоматизацию технологии.

Был выполнен комплекс исследований по оптимизации параметров движения схвата манипулятора и технологических режимов процесса, накоплен банк данных, которые позволили выбрать промышленный робот (ПР) типа СМ4014011.

В настоящей работе рассмотрена задача кинематического анализа, необходимая при расчёте траектории движения схвата манипулятора.

Выполняя кинематическое исследование целесообразно системы декартовых координат выбирать следующим образом [1]: ось Z_i направляется по оси кинематической пары (звенья i , $i+1$); начало координат системы, жёстко связанной со звеном i берётся на общем перпендикуляре к осям Z_i и Z_{i-1} , либо в точке их пересечения, если такая есть. Если оси Z_i и Z_{i-1} совпадают или параллельны, то начало берётся в любой точке оси кинематической пары. Ось X_i направляется по общему перпендикуляру к осям Z_{i-1} и Z_i и ориентируется от точки пересечения перпендикуляра с осью Z_{i-1} к точке пересечения с осью Z_i . Если оси Z_{i-1} и Z_i пересекаются, то ось X_i направляется в любую сторону по нормали к плоскости, содержащей эти оси. Если оси Z_i и Z_{i-1} совпадают, то ось X_i ориентируется произвольным образом. Начало системы координат, связанной со стойкой (звено 0) может быть в любой точке оси кинематической пары звеньев 0-1. Ось X_0 ориентируется произвольным образом. Систему координат, связанную со схватом, можно направлять любым произвольным удобным образом.

Выбрав специальным образом координатные оси, переход из одной системы координат в другую можно описать с помощью лишь четырёх параметров:

θ_i - угол поворота системы " $i-1$ " вокруг оси Z_{i-1} до тех пор пока ось X_{i-1} не станет параллельной оси X_i ;

S_i - сдвиг повернутой системы вдоль оси Z_{i-1} пока оси X_{i-1} и X_i не окажутся на одной прямой;

a_i - сдвиг вдоль оси X_i пока не совпадут начала систем координат;

α_i - поворот вокруг оси X_i до совмещения оси Z_{i-1} с осью Z_i .

Тогда матрица перехода, связывающая системы " $i-1$ " и " i ", имеет вид

$$M_i = \begin{vmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cdot \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cdot \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & S_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (I)$$

Для любой одноподвижной кинематической пары только один из четырёх указанных параметров является переменной величиной, остальные должны быть константами.

Формула, связывающая радиусы - векторы одной и той же точки в системах " i " и " $i-1$ "

$$\vec{r}_{i-1} = M_i \cdot \vec{r}_i, \quad (2)$$

где $\vec{r}_i$, $\vec{r}_{i-1}$ - матрицы-столбцы, определяющие положение точки звена соответственно в " i " и " $i-1$ " системах координат.

Промышленный робот СМ4014011 имеет следующие звенья: 0-основание; 1 - колонна; 2 - каретка; 3-рука; 4 - кисть; 5 - схват (рис. 1).

С каждым звеном кинематической цепи связывается система координат. С основанием система $X_0 Y_0 Z_0$, ось Z_0 которой направляется по оси прачательной кинематической пары (0-1). Начало O_0 выбирается в произвольной точке этой оси, ось X_0 ориентируется произвольным образом. С колонной связывается система $X_1 Y_1 Z_1$, ось Z_1 которой направляется по оси поступательной пары (1-2). При этом оси Z_1 и Z_0 оказываются параллельными. Ось X_1 ориентируется по общему перпендикуляру к осям Z_0 и Z_1 в направлении от точки пересечения этого перпендикуляра с осью Z_0 к точке пересечения с осью Z_1 . С кареткой связывается система $X_2 Y_2 Z_2$, ось Z_2 которой направляется по оси поступательной пары (2-3). Так как оси Z_1 и Z_2 пересекаются, то начало системы O_2 берётся в точке их пересечения, а ось X_2 ориентируется перпендикулярно к плоскости, содержащей эти оси.

С рукой 3 и кистью 4 соответственно связываются системы $X_3 Y_3 Z_3$ и $X_4 Y_4 Z_4$, оси которых ориентируются по аналогичному правилу. Система координат $X_5 Y_5 Z_5$, связанная со схватом ориентируется произвольным образом.

Данный манипулятор имеет пять степеней свободы, которым соответствуют следующие обобщённые координаты: φ_1 , S_2 , S_3 ,

S_4 , φ_5 .

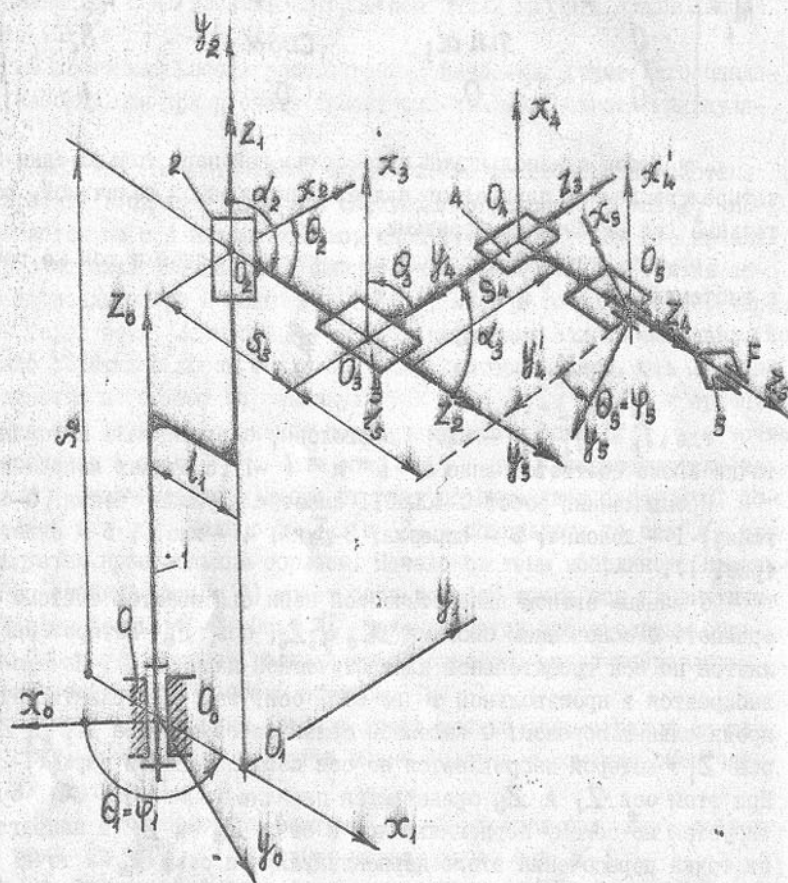


Рис. 1. Схема для расчёта координат точки схвата руки промышленного робота СМ40Ц40П.

В табл. I приведена характеристика кинематических пар и указаны значения параметров, используемых в матрицах перехода.

Таблица I.

Значения параметров кинематических пар

Кинематическая пара	Тип	Номер звена	Параметры			
			θ	S	Q	α
0 - 1	вращательная	1	φ_1	0	l_1	0
1 - 2	Поступательная	2	90°	S_2	0	90°
2 - 3	Поступательная	3	90°	S_3	0	90°
3 - 4	Поступательная	4	0	S_4	0	270°
4 - 5	вращательная	5	φ_5	l_5	0	0

В соответствии с этой таблицей и формулой (I) матрицы перехода записываются следующим образом:

$$M_1 = \begin{vmatrix} \cos \varphi_1 & -\sin \varphi_1 & 0 & l_1 \cos \varphi_1 \\ \sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 & 0 & l_1 \sin \varphi_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix};$$

$$M_2 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & S_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad M_3 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & S_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix};$$

$$M_4 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & S_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad M_5 = \begin{vmatrix} \cos \varphi_5 & -\sin \varphi_5 & 0 & 0 \\ \sin \varphi_5 & \cos \varphi_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

На основании формулы (2) записываем формулу, определяющую положение точки F схвата в системе, связанной с основанием.

$$\vec{r}_{F_0} = M_1 \times M_2 \times M_3 \times M_4 \times M_5 \times \vec{r}_{F_5}$$

Применяя правило умножения матриц, получаем расчётные уравнения

$$\left. \begin{aligned} x_{F_0} &= x_{F_5} \cdot \sin \varphi_5 \cdot \sin \varphi_1 + y_{F_5} \cdot \cos \varphi_5 \cdot \sin \varphi_1 + z_{F_5} \cdot \cos \varphi_1 + \\ &+ (l_5 + s_3) \cdot \cos \varphi_1 - s_4 \cdot \sin \varphi_1 + l_1 \cdot \cos \varphi_1; \\ y_{F_0} &= -x_{F_5} \cdot \sin \varphi_5 \cdot \cos \varphi_1 - y_{F_5} \cdot \cos \varphi_5 \cdot \cos \varphi_1 + z_{F_5} \cdot \sin \varphi_1 + \\ &+ (l_5 + l_3) \cdot \sin \varphi_1 + s_4 \cdot \cos \varphi_1 + l_1 \cdot \sin \varphi_1; \\ z_{F_0} &= x_{F_5} \cdot \cos \varphi_5 - y_{F_5} \cdot \sin \varphi_5 + s_2. \end{aligned} \right\} (3)$$

Используя уравнения (3), определяется траектория движения рабочей точки схвата в процессе выполнения технологической операции наплавки при производстве концевого инструмента, а также форма и размеры рабочего пространства. Расчёты выполнялись для центра тяжести концевого инструмента, расположенного в схвате ИР типа СМ40П40П с координатами $x_{F_5}=0$, $y_{F_5}=0$, $z_{F_5}=250$ мм и для точки, расположенной на части руки, противоположной схвату с координатами $x_{K_3}=350$ мм, $y_{K_3}=-1820$ мм, $z_{K_3}=-150$ мм. Разработанный технологический процесс электрошлаковой наплавки концевого инструмента имеет 10 операций, в четырёх из которых используется промышленный робот:

I операция - концевой инструмент транспортируется от магазина-накопителя к наплавочному столу, а затем ориентируется в рабочее положение;

II операция - выполняется процесс наплавки концевого инструмента, при котором он перемещается с тормозной скоростью с промежуточными фазами выстоя;

III операция - наплавленный концевой инструмент транспортируется к месту складирования;

IV операция - рука возвращается в исходное положение.

Промышленный робот, внедрённый для производства концевого инструмента механизмирует не только основные технологические операции, но и вспомогательные, обеспечивает высокую точность позиционирования и реализует повторяемость операционного цикла. Производительность одного комплекса, оборудованного ИРСМ40П40П составляет 40...60 деталей в смену. Масса одной детали до 15 кг.

ЛИТЕРАТУРА

I. Механика промышленных роботов: Учеб. пособие для вузов: В 3 кн./Под ред. К.В.Фролова, Е.И.Воробьёва. Кн. I: Кинематика и динамика /Е.И.Воробьёв, С.А.Попов, Г.И.Шевелёва. - М.: Высш. шк., 1988. - 304 с.

УСТОЙЧИВОСТЬ СЖАТО-ЗАКРУЧЕННЫХ СТЕРЖНЕЙ

Шевченко Ф.Л., Улитин Г.А., Малышко И.А., Татьяначенко А.Г.

При сверлении отверстий, у которых отношение l/d больше 20, приходится сталкиваться с таким явлением, как поломка сверл. Эти поломки связаны, в основном, с пакетированием стружки, вызывающим увеличение составляющих сил резания. Для устранения пакетирования стружки необходимо увеличивать углы наклона стружечных канавок, но это оказывает существенное влияние на устойчивость инструмента. Решению данной проблемы посвящены работы [1,2] и ряд других. Однако проблема устойчивости сжато-закрученных стержней, в том числе и сверл, остается актуальной и сегодня.

Спиральное сверло представляет собой естественно закрученный стержень, главные оси поперечного сечения которого поворачиваются вокруг продольной оси на 180 градусов на участке, соответствующем шагу стружечной канавки H (рис. 1). Геометрические характеристики сверла можно вычислить по зависимостям, приведенным в работе [1].

Изгибная жесткость в системе главных центральных осей поперечного сечения:

$$B_x = EI_x = 0,031015 \cdot E d^4, \quad B_y = EI_y = 0,00603 \cdot E d^4.$$

$$\text{Крутильная жесткость } C = GI_k = 0,00651 \cdot G d^4.$$

Модуль сдвига инструментальных сталей при коэффициенте Пуассона $\mu = 0,3$ можно принять равным $G = 7,7 \cdot 10^4$ МПа.

$$\text{Площадь поперечного сечения } F = 0,334 \cdot d^2.$$

$$\text{Угол наклона спирали } \varphi = 28^\circ.$$

$$\text{Шаг спиральной канавки } H = \pi d / \operatorname{tg} \varphi.$$

Естественная закрутка спирали, т.е. относительный угол естественной закрутки $\tau_0 = 2\pi/H = 2\operatorname{tg} \varphi/d$.

Геометрические зависимости естественно закрученных стержней.
В неподвижной системе координат оси x, y — главные, центральные. Продольная ось z . Соответствующие оси в подвижной системе координат — i, j, k . Линейные перемещения по направлению этих осей — u, v, w . Углы поворота подвижного трехгранника системы координат относительно осей i, j, k обозначены α, β, γ соответственно. Главные компоненты кривизны ρ, q в плоскостях yz, xz и кручение стержня τ в деформированном состоянии определяются дифференциальными зависимостями [2]

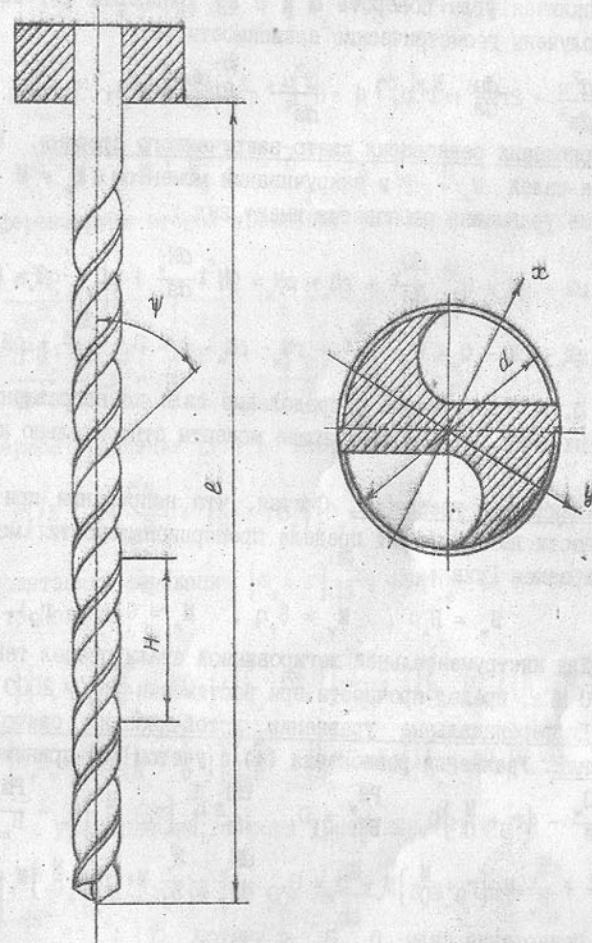


Рис. 1. Расчетная схема сверла

$$\alpha = -\frac{du}{ds} - ru, \quad \beta = \frac{dv}{ds} - rv, \quad \gamma = \frac{dw}{ds} = 0, \quad (1)$$

$$\rho = \frac{d\alpha}{ds} - r\beta, \quad q = \frac{d\beta}{ds} + r\alpha, \quad r = r_0 + \frac{d\gamma}{ds}; \quad (2)$$

где s — длина дуги спирали.

Исключая углы поворота α и β из уравнений (2) на основании (1), получены геометрические зависимости [2]

$$\rho = \frac{d^2v}{ds^2} - 2r\frac{du}{ds} + r^2u, \quad q = \frac{d^2u}{ds^2} - 2r\frac{dv}{ds} - r^2v, \quad r = r_0 + \frac{M}{C}. \quad (3)$$

Уравнения равновесия сжато-закрученного стержня. При сжатии стержня силой $N_z = -P$ и закручивании моментом $M_z = M$ дифференциальные уравнения равновесия имеют вид:

$$\frac{dQ_x}{ds} + rQ_y + qN_z = 0, \quad \frac{dQ_y}{ds} + rQ_x + \rho N_z = 0, \quad \frac{dN_x}{ds} + \rho Q_y - qQ_x = 0, \quad (4)$$

$$\frac{dM_x}{ds} + qM_z - rM_y - Q_y = 0, \quad \frac{dM_y}{ds} + rM_x - \rho M_z + Q_x = 0, \quad \frac{dM_z}{ds} + \rho M_y - qM_x = 0.$$

Здесь Q, N — поперечные и продольные силы по направлению соответствующих осей, а M — изгибающие моменты относительно координатных осей.

Физические уравнения. Считая, что напряжения при потере устойчивости не превышают предела пропорциональности, можно использовать закон Гука:

$$M_x = B_x \rho, \quad M_y = B_y q, \quad M_z = C \cdot (r - r_0). \quad (5)$$

Для инструментальной легированной стали предел текучести $\sigma_T = 1200$ МПа, предел прочности при растяжении $\sigma_B \approx 2000$ МПа.

Дифференциальные уравнения устойчивости сжато-закрученных стержней. Уравнения равновесия (4) с учетом (5) принимают вид

$$\frac{dQ_x}{ds} - \left(r_0 + \frac{M}{C}\right)Q_y - \frac{rM_y}{B_y} = 0, \quad \frac{dQ_y}{ds} + \left(r_0 + \frac{M}{C}\right)Q_x - \frac{rM_x}{B_x} = 0, \quad (6)$$

$$\frac{dM_x}{ds} + \frac{M_y}{B_y}M - \left(r_0 + \frac{M}{C}\right)M_y - Q_y = 0, \quad \frac{dM_y}{ds} - \frac{M_x}{B_x}M + \left(r_0 + \frac{M}{C}\right)M_z + Q_x = 0. \quad (7)$$

Поперечные силы Q_x, Q_y с учетом (7):

$$Q_x = -\frac{dM_y}{ds} + \frac{M_x}{B_y}M - \left(r_0 + \frac{M}{C}\right)M_x = -\frac{dM_x}{ds} - \delta_x M_x,$$

$$Q_y = \frac{dM_x}{ds} + \frac{M_y}{B_y}M - \left(r_0 + \frac{M}{C}\right)M_y = \frac{dM_y}{ds} - \delta_y M_y; \quad (8)$$

подставим в (6)

$$\frac{d^2M_y}{ds^2} + \left(\delta_x + r\right)\frac{dM_x}{ds} + \left(\frac{P}{B_y} - r\delta_y\right)M_y = 0, \quad (9)$$

$$\frac{d^2M_x}{ds^2} - \left(\delta_y + r\right)\frac{dM_y}{ds} + \left(\frac{P}{B_x} - r\delta_x\right)M_x = 0.$$

$$\text{Здесь:} \quad \delta_x = r_0 + \frac{M}{C} - \frac{M}{B_x}, \quad \delta_y = r_0 + \frac{M}{C} - \frac{M}{B_y}. \quad (10)$$

Продифференцируем второе уравнение (9) дважды, а первое один раз:

$$\begin{aligned} \frac{d^3M_y}{ds^3} + \left(\delta_x + r\right)\frac{d^2M_x}{ds^2} + \left(\frac{P}{B_y} - r\delta_y\right)\frac{dM_y}{ds} &= 0, \\ \frac{d^4M_x}{ds^4} - \left(\delta_y + r\right)\frac{d^3M_y}{ds^3} + \left(\frac{P}{B_x} - r\delta_x\right)\frac{d^2M_x}{ds^2} &= 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Подставим первое уравнение (11) во второе

$$\frac{d^4M_x}{ds^4} + \left(\delta_x + r\right)\left(\delta_y + r\right)\frac{d^2M_x}{ds^2} + \left(\frac{P}{B_y} - r\delta_y\right)\left(\delta_y + r\right)\frac{dM_y}{ds} + \left(\frac{P}{B_x} - r\delta_x\right)\frac{d^2M_x}{ds^2} = 0.$$

Если сюда подставить выражение $\left(\delta_y + r\right)\frac{dM_y}{ds}$, взятое из второго уравнения (9), то получим

$$\begin{aligned} \frac{d^4M_x}{ds^4} + \left[\left(\delta_x + r\right)\left(\delta_y + r\right) + \left(\frac{P}{B_y} - r\delta_y\right) + \left(\frac{P}{B_x} - r\delta_x\right)\right]\frac{d^2M_x}{ds^2} + \left(\frac{P}{B_y} - r\delta_y\right)\left(\frac{P}{B_x} - r\delta_x\right)M_x &= 0, \\ \text{или} \quad \frac{d^4M_x}{ds^4} + \left[\delta_x\delta_y + r^2 + P\left(\frac{1}{B_x} + \frac{1}{B_y}\right)\right]\frac{d^2M_x}{ds^2} + \left(\frac{P}{B_y} - r\delta_y\right)\left(\frac{P}{B_x} - r\delta_x\right)M_x &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Дополнительные уравнения из второго уравнения (9) и (8)

$$\frac{dM_y}{ds} = \frac{1}{\delta_y + r}\left[\frac{dM_x}{ds^2} + \left(\frac{P}{B_y} - r\delta_x\right)M_x\right], \quad Q_x = -\frac{dM_y}{ds} - \delta_x M_x, \quad Q_y = \frac{dM_x}{ds} - \delta_y M_y;$$

потребуется для удовлетворения граничных условий.

С учетом обозначений (10) получаем расчетные уравнения

$$\begin{aligned} \frac{d^4 M_x}{ds^4} + \left[2r^2 + \frac{M^2}{B_x B_y} + \left(\frac{1}{B_x} + \frac{1}{B_y} \right) (P - Mr) \right] \frac{dM_x}{ds^2} + \\ + \left[\frac{P}{B_y} - r^2 + \frac{Mr}{B_y} \right] \left[\frac{P}{B_x} - r^2 + \frac{Mr}{B_x} \right] M_x = 0, \\ \frac{dM_y}{ds} = \frac{1}{2r - M/B_y} \left[\frac{d^2 M_x}{ds^2} + \left(\frac{P}{B_x} - r^2 + \frac{Mr}{B_x} \right) M_x \right], \\ Q_x = -\frac{dM_y}{ds} - \left(r - \frac{M}{B_x} \right) M_x, \quad Q_y = \frac{dM_x}{ds} - \left(r - \frac{M}{B_y} \right) M_y. \end{aligned} \quad (13)$$

Введем обозначения:

$$2a = \frac{P+Mr}{B_x} - r^2, \quad 2b = \frac{P+Mr}{B_y} - r^2, \quad 2c = 4r^2 + \frac{M^2}{B_x B_y} - 2Mr \left(\frac{1}{B_x} + \frac{1}{B_y} \right).$$

При этом уравнение (13) примет окончательный вид

$$\frac{d^4 M_x}{ds^4} + 2(a+b+c) \frac{d^2 M_x}{ds^2} + 4abM_x = 0. \quad (14)$$

Если здесь положить $r = r_0$, что согласно (3) $M = 0$, то получим частное решение без учета деформаций кручения стержня [2]. Если положить $r_0 = 0$ (т.е. при отсутствии естественной закрутки), то получим решение, изложенное в работе [3].

Представляя $M_x = Ce^{\lambda x}$, из (14) получим характеристическое уравнение $\lambda^4 + 2\lambda^2(a+b+c) + 4ab = 0$, корни которого $\lambda_{1,2} = \pm 2im_1$, $\lambda_{3,4} = \pm 2im_2$. Здесь:

$$\begin{aligned} 2m_1 &= \sqrt{a+b+c} + \sqrt{(a+b+c)^2 - 4ab}, \\ 2m_2 &= \sqrt{a+b+c} - \sqrt{(a+b+c)^2 - 4ab}. \end{aligned} \quad (15)$$

Устойчивость стержней малых и больших естественных закруток.
К таким стержням относятся стержни, параметры которых при $B_x > B_y$ удовлетворяют условиям

$$A/B > 0 \quad \text{и} \quad \sqrt{A^2 - B} - 1 < 0, \quad (16)$$

где $A = a+b+c$, $B = 4ab$.

При этих условиях $ab > 0$ и корни (15) будут действительными, а решение (14) принимает вид

$$M_x = C_1 \cos 2m_1 s + C_2 \sin 2m_1 s + C_3 \cos 2m_2 s + C_4 \sin 2m_2 s, \quad (17)$$

Подставляя M_x во второе уравнение (13)

$$\frac{dM_x}{ds} = \frac{1}{2r - M/B_y} \left(\frac{dM_y}{ds} + 2aM_x \right),$$

получим

$$\frac{dM_x}{ds} = \frac{2a-4m_1^2}{2r-M/B_x} [C_1 \cos 2m_1 s + C_2 \sin 2m_1 s] + \frac{2a-4m_2^2}{2r-M/B_x} [C_3 \cos 2m_2 s + C_4 \sin 2m_2 s].$$

После интегрирования этой зависимости получаем уравнение изгибающих моментов M_y

$$M_y = \chi_1 [C_1 \sin 2m_1 s - C_2 \cos 2m_1 s] + \chi_2 [C_3 \sin 2m_2 s - C_4 \cos 2m_2 s], \quad (18)$$

$$\text{где} \quad \chi_1 = \frac{a - 2m_1^2}{m_1(2r - M/B_y)}, \quad \chi_2 = \frac{a - 2m_2^2}{m_2(2r - M/B_y)}. \quad (19)$$

На основании (17), (18) рассматриваются условия закрепления стержня на опорах, что позволяет найти параметры критических силовых факторов.

Для шарнирно закрепленного стержня при выборе начала координат на конце стержня имеем условия $M_x(0) = M_x(l) = 0$, $M_y(0) = M_y(l) = 0$. На основании (17), (18) получаем систему уравнений:

$$\begin{aligned} C_1 + C_2 &= 0, \\ -\chi_1 C_2 - \chi_2 C_4 &= 0, \end{aligned} \quad (20)$$

$$C_1 \cos 2m_1 l + C_2 \sin 2m_1 l + C_3 \cos 2m_2 l + C_4 \sin 2m_2 l = 0,$$

$$C_1 \chi_1 \sin 2m_1 l + C_2 \chi_1 \cos 2m_1 l + C_3 \chi_2 \sin 2m_2 l + C_4 \chi_2 \cos 2m_2 l = 0,$$

Здесь $l = L/\cos \varphi$ — длина спирали сверла.

Из (20) получаем систему однородных уравнений

$$\begin{aligned} C_1 [\chi_2 \cos 2m_1 l - \chi_2 \cos 2m_2 l] + C_2 [\chi_2 \sin 2m_1 l - \chi_1 \sin 2m_2 l] &= 0, \\ C_1 [\chi_1 \sin 2m_1 l - \chi_2 \sin 2m_2 l] + C_2 [\chi_1 \cos 2m_2 l - \chi_1 \cos 2m_1 l] &= 0. \end{aligned} \quad (21)$$

Для получения ненулевых решений определитель системы (21) приравняем нулю, в результате чего получаем трансцендентное уравнение

$$2\chi_1 \chi_2 [\cos 2m_1 l \cdot \cos 2m_2 l - 1] + [\chi_1^2 + \chi_2^2] \sin 2m_1 l \cdot \sin 2m_2 l = 0. \quad (22)$$

Если ввести обозначение

$$\omega = \frac{a - 2m_2^2}{a - 2m_1^2} \cdot \frac{m_1}{m_2}, \quad (23)$$

то получим следующее расчетное уравнение

$$2\omega[\cos 2m_1 l \cdot \cos 2m_2 l - 1] + [1 + \omega^2] \sin 2m_1 l \cdot \sin 2m_2 l = 0. \quad (24)$$

В частном случае круглого стержня, когда $B_x = B_y$, $\omega = 1$; отсюда получаем известное решение [2].

Устойчивость стержней средней естественной закрутки. К этому случаю относятся стержни, параметры которых не удовлетворяют условиям (16). Здесь $ab < 0$ и корни (15) характеристического уравнения принимают вид

$$2m_1 = P\sqrt{A + \sqrt{A^2 - B}}, \quad 2m_2 = \sqrt{A^2 - B} - A; \quad (25)$$

а решение дифференциального уравнения (14) будет представлено в гиперболическо-тригонометрических функциях

$$M_x = C_1 \cos 2m_1 s + C_2 \sin 2m_1 s + C_3 \operatorname{ch} 2m_2 s + C_4 \operatorname{sh} 2m_2 s \quad (26)$$

Теперь второе уравнение (13) с учетом (26) принимает следующий вид

$$M_y = \chi_1 [C_1 \sin 2m_1 s - C_2 \cos 2m_1 s] + \chi_2 [C_3 \operatorname{sh} 2m_2 s + C_4 \operatorname{ch} 2m_2 s], \quad (27)$$

где
$$\chi_1 = \frac{a - 2m_1^2}{(2r - M/B_y)m_1}, \quad \chi_2 = \frac{a + 2m_2^2}{(2r - M/B_y)m_2}. \quad (28)$$

Для шарнирно закрепленного стержня из условий $M_x(0) = M_x(l) = 0$, $M_y(0) = M_y(l) = 0$ получаем систему уравнений:

$$C_1 + C_3 = 0,$$

$$-\chi_1 C_2 + \chi_2 C_4 = 0,$$

$$C_1 \cos 2m_1 l + C_2 \sin 2m_1 l + C_3 \operatorname{ch} 2m_2 l + C_4 \operatorname{sh} 2m_2 l = 0,$$

$$C_1 \chi_1 \sin 2m_1 l - C_2 \chi_1 \cos 2m_1 l + C_3 \chi_2 \operatorname{sh} 2m_2 l + C_4 \chi_2 \operatorname{ch} 2m_2 l = 0.$$

Отсюда получаем систему уравнений:

$$C_1 [\chi_2 \cos 2m_1 l - \chi_2 \operatorname{ch} 2m_2 l] + C_2 [\chi_2 \sin 2m_1 l + \chi_1 \operatorname{sh} 2m_2 l] = 0,$$

$$C_1 [\chi_1 \sin 2m_1 l - \chi_2 \operatorname{sh} 2m_2 l] - C_2 [\chi_1 \cos 2m_1 l - \chi_1 \operatorname{ch} 2m_2 l] = 0.$$

Приравняв определитель этой системы нулю, получаем расчетное уравнение

$$2\omega(\cos 2m_1 l \cdot \operatorname{ch} 2m_2 l - 1) + (\omega^2 - 1) \sin 2m_1 l \cdot \operatorname{sh} 2m_2 l = 0, \quad (29)$$

где

$$\omega = \frac{\chi_2}{\chi_1} = \frac{a + 2m_1^2}{a + 2m_2^2} \cdot \frac{m_1}{m_2}.$$

Примеры расчета сверла. Спиральное сверло диаметра $d = 10$ мм, длиной $l = 86$ мм, углом наклона спирали $\phi = 25^\circ$ и шагом спирали $H = 66$ мм.

Изгибная жесткость сверла:

$$B_x = EI_x = 0,0310 \cdot 0,01^4 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} = 64 \text{ Нм}^2,$$

$$B_y = EI_y = 0,00603 \cdot 0,01^4 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} = 12 \text{ Нм}^2.$$

$$\text{Крутильная жесткость } C = 0,000651 \cdot 0,1^4 \cdot 7,7 \cdot 10^{10} = 5 \text{ Нм}^2.$$

$$\text{Естественная закрутка } r_\theta = 2 \tan \phi / d = 95 \text{ м}^{-1}.$$

Результаты расчета на ЭВМ при различных закрутках сверла приведены в табл. 1.

В частном случае круглого стержня, когда $B_x = B_y$, при $M = 0$ независимо от закрутки получим значение критической силы, соответствующее формуле Эйлера $P_{кр} = \pi^2 EI / l^2$. Например, при $B_x = B_y = 12 \text{ Нм}^2$ получим $P_{кр} = 12\pi^2 / 0,095^2 = 13120 \text{ Н}$, а при $B_x = B_y = 95 \text{ Нм}^2$ найдем $P_{кр} = 103890 \text{ Н}$.

Также в частном случае круглого стержня, когда $B_x = B_y$, при $P = 0$ независимо от закрутки получим значение критического момента $M_{кр} = 2\pi EI / l$. Например, при $B_x = B_y = 12 \text{ Нм}^2$ найдем $M_{кр} = 793 \text{ Нм}$, а при $B_x = B_y = 95 \text{ Нм}^2$ получаем $M_{кр} = 6283 \text{ Нм}$.

Из табл. 1 видно, что критический момент практически не зависит от изгибной жесткости и уровня естественной закрутки стержня и может быть вычислен по формуле

$$M_{кр} = \frac{2\pi EI_x}{l} \cdot \frac{1}{\sqrt{4B_y/C + 1}}. \quad (30)$$

Так для вышеприведенного сверла по (29) получим $M_{кр} = 1300 \text{ Нм}^2$.

Критическую силу при отсутствии естественной закрутки можно вычислять по формуле $P_\theta = \pi^2 B_y / l^2$. Для приведенного примера $P_\theta = 13120 \text{ Н}$. При максимальной закрутке

$$P_{\max} = \frac{2}{1 + B_x/B_y} \cdot \frac{\pi^2 B_y}{l^2} \cdot u.$$

В нашем примере при $r_\theta = 95 \text{ м}^{-1}$ $P_{\max} = 22000 \text{ Нм}$.

Таблица 1

r_θ	0	10	20	40	95
M, Нм	P, Н	P, Н	P, Н	P, Н	P, Н
0	12927	13174	13919	16788	21366
100	12882	13730	15163	19042	20993
200	13294	15099	17299	19341	20799
300	20222	17477	18156	19004	19783
400	16729	16801	17464	18064	18956
500	15538	16466	16518	17082	17597
600	14698	14778	15200	15506	16227
700	12982	13589	13496	13990	14404
800	11202	11314	11662	12289	12486
900	9009	9365	9342	9812	10188
1000	6542	6683	6997	7133	7719
1100	4151	4083	4106	4525	4937
1200	785	951	1246	1358	1918
1220		355	601		
1230	249	59	249	434	
1235	0				
1240			78	127	
1250					280
1264					19

Для произвольной закрутки при $M = 0$ критическую силу можно вычислять по формуле

$$P = \frac{\pi^2 B_y}{l^2} \cdot \frac{P_{\max} - P_\theta}{r_{\max}} \cdot r.$$

Обратим внимание на то, что с увеличением крутящего момента критическая сила до некоторых пор будет увеличиваться и зависимость

$$\left(\frac{M}{M_{\text{кр}}}\right)^2 + P/P_{\text{кр}} = 1 \quad (31)$$

здесь неприменима. Чем больше закрутка стержня и чем меньше различие между изгибными жесткостями относительно главных центральных осей, тем справедливее зависимость (31).

Таким образом, полученные аналитические зависимости для осевой силы и крутящего момента позволяют не прибегая к экспериментальным исследованиям определять рациональные режимы работы осевых инструментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пономарев С.Д. и др. Расчеты на прочность в машиностроении. М.: Гос. науч. техн. издат. машиностроит. лит., 1959. 1118 с.
2. Шашков И.К. Об устойчивости сжатого и скрученного призматического стержня с произвольной формой поперечного сечения. Инженерный сборник, том VII, 1950, с. 102-122.
3. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. - М.: Наука, 1967. - 984 с.

Горкуша А.Е., Молчанов А.Д. Исследование подшипников скольжения с неметаллическими вкладышами при смешанном трении	4
Байков Е.В., Клименко И.В. Получение листов с регулируемой шероховатостью для штамповки	12
Матюха П.Г., Изотов В.Ю. Определение времени формирования критических параметров рабочей поверхности круга при шлифовании труднообрабатываемых материалов алмазными кругами	21
Мизин Б.М. Некоторые вопросы исследования напряженного состояния пологих оболочек	28
Михайлов А.Н. Закономерности эволюционного процесса развития технологий машиностроения	32
Михайлов А.Н., Ищенко А.Л., Малышко И.И., Костюченко С.В. Элементы синтеза сборочных систем непрерывного действия с использованием методов моделирования	50
Михайлов А.Н., Малышко И.И., Ищенко А.Л. Структурно-логическая модель процесса формообразования ступенчатых отверстий осевым комбинированным инструментом на технологических системах непрерывного действия	56
Сопилкин Г.В., Ошовская Е.В., Руденко Р.В., Нижник А.В. Исследование предохранительно-демпфирующей муфты	62
Сопилкин Г.В., Ченцов Н.А., Ошовская Е.В. Модели экспертно-диагностической системы технического обслуживания оборудования	73
Стойко Е.П., Кучер В.С., Кучер Т.В. Роботизация технологического процесса восстановления и упрочнения деталей машин в машиностроении	83
Шевченко Ф.Л., Улитин Г.А., Малышко И.А., Татьяначенко А.Г. Устойчивость сжато-закрученных стержней	90