

оптимальным выбором ее схемы и методики расчета на выносливость всех элементов от различного сочетания действующих на перегружатель в разных режимах работы нагрузок. Это позволяет с достаточной степенью точности определить действующие на все элементы металлоконструкции нагрузки и напряжения в них, и конструктивными методами свести последние к допускаемым величинам, что является важной практической задачей.

Анализ исследований и публикаций. Анализ отечественных и зарубежных аналогов перегружателей показывает, что вопросам напряженно-деформированного состояния металлоконструкций перегружателей и их прочностных характеристик уделяется большое внимание.

В работе [1] представлены различные виды металлоконструкций перегружателей. По конструктивным схемам металлоконструкций различают перегружатели жесткой и шарнирной системы. Перегружатели жесткой системы характеризуются пространственно жесткой металлоконструкцией, исключаяющей смещение опор в горизонтальной плоскости. У перегружателей шарнирной системы одна из опор жесткая, другая – шарнирная. Жесткая опора соединяется с мостом жестко и образует с ним пространственную неизменяемую конструкцию. Шарнирная опора соединяется с мостом шарнирно, что позволяет ей компенсировать температурные деформации моста и его перекос.

Постановка задачи. Требуется исследовать напряженно-деформированное состояние металлоконструкции перегружателя ПМГ-20 с определением напряжений от действующих нагрузок в различном их сочетании.

Изложение материала и результатов исследований. Перегружатель ПМГ-20, обеспечивающий непрерывный технологический процесс погрузки угля в коксовые печи, входит в состав технологического оборудования Алчевского коксохимического завода. Общий вид перегружателя ПМГ-20 представлен на рис.1.

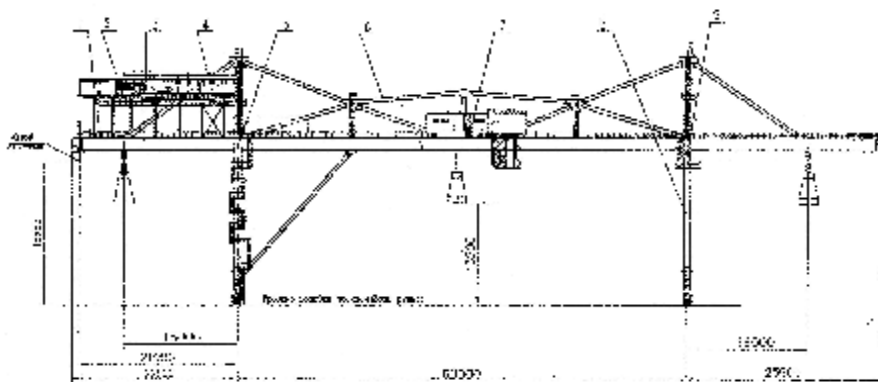


Рис.1. Общий вид перегружателя ПМГ-20

Мост перегружателя 1 опирается на жесткую 5 и шарнирную 8 опоры,

последняя соединена с мостом шарниром 9. На консоли 3 со стороны жесткой опоры 5 расположены ремонтное помещение 4 и ремонтный кран 2. Мост перегружателя 1 выполнен из двух коробчатых балок, по верхнему поясу которых передвигается грейферная тележка 7. Мост усилен шпренгельной системой 6.

Основным методом расчета металлоконструкции перегружателя является метод предельных состояний, основы которого разработаны Н.С. Стрелецким.

За расчетные предельные состояния принимаются такие, при которых конструкция под влиянием силовых воздействий перестает удовлетворять требованиям эксплуатации.

Использование этого метода, основанного на статическом учете работы конструкции, позволяет отказаться от недостаточно обоснованного запаса прочности и открывает широкие возможности устанавливать необходимые размеры и поперечные сечения элементов металлоконструкций, исходя из конкретных условий ее эксплуатации.

Первое предельное состояние – по прочности и устойчивости форм элементов от однократного действия наибольших нагрузок, ожидаемых за срок службы крана. Второе предельное состояние – по выносливости несущих элементов от многократного действия нагрузок. Третье предельное состояние – по упругой деформации несущих элементов.

Основная цель расчета по методу предельных состояний – получить гарантии, что в процессе нормальной эксплуатации конструкции не наступит ни одно из описанных выше предельных состояний.

При расчете стальных конструкций по методу предельных состояний должны выполняться условия

$$\sigma_p \leq mR,$$

где σ_p – расчетное напряжение; m – коэффициент условия работы; R – расчетное сопротивление материала, равное

$$R = \frac{R^H}{k_m},$$

где R^H – нормативное сопротивление материала; k_m – коэффициент безопасности по материалу.

В расчетах на прочность и устойчивость должны учитываться следующие нормативные нагрузки:

а) весовые постоянные:

- вес стальных конструкций;
- вес механического и электрооборудования;

б) весовые подвижные нагрузки, действие которых возможно в любом сечении вдоль пролета крана:

- вес грузовой грейферной тележки G_m ;
- вес груза $G_{гр}$ и горизонтальные силы от веса груза, возникающие

при отклонении грузовых канатов (силы приложены в месте контакта ходовых колес с рельсом):

$$Q_x = Q \operatorname{tg} \alpha, \quad Q_y = Q \operatorname{tg} \beta,$$

где $\alpha = 3^\circ$, $\beta = 3^\circ$ – углы отклонения канатов;

в) инерционные нагрузки:

- горизонтальные инерционные нагрузки T , возникающие при разгоне и торможении тележки, принимаются для мостовых перегружателей равными 1/10 от суммы давлений всех колес тележки. Эти силы приложены в месте контакта ходовых колес и направлены вдоль подтележечных рельсов;

- горизонтальные инерционные нагрузки H , возникающие при передвижении тележки, принимаются равными для мостовых перегружателей 1/10 от суммы давлений всех колес тележки. Эти силы приложены в месте контакта ходовых колес и направлены поперек подтележечных рельсов;

- горизонтальные инерционные нагрузки, возникающие при разгоне и торможении крана;

з) **другие нагрузки** (перекос крана);

д) **особые нагрузки** (горизонтальные продольные нагрузки при наезде крана на упоры).

Все нормативные нагрузки принимаются с учетом коэффициентов перегрузок; динамическое воздействие груза при подъеме учитывается динамическим коэффициентом; динамическое воздействие металлических конструкций, оборудования, грузовой тележки, груза при передвижении крана учитывается коэффициентом толчков.

Расчет металлоконструкции мостового перегружателя ПМГ-20 проводится для следующих расчетных случаев:

- рабочее состояние “подъем груза и передвижение тележки” (перегружатель находится в неподвижном состоянии, а грейферная тележка – в середине пролета и в крайних положениях на консолях);

- рабочее состояние “передвижение крана” (грейферная тележка располагается в пределах пролета или на одной из опор);

- нерабочее состояние (перегружатель не работает и застопорен, тележка без груза расположена на одной из опор).

Деформации от нормативных нагрузок не должны превышать:

- прогиб балок моста при статическом воздействии грейферной тележки - 1/700 пролета;

- уклон пути на консолях, создающийся под воздействием грейферной тележки с грузом – 0,003 длины консоли.

Расчет от статических воздействий выполнен на программном комплексе “ЛИРА – WINDOWS” [2], разработанном НИИ автоматизированных систем в строительстве (НИИАСС), г. Киев, предназначенном для численного исследования на ЭВМ прочности и устойчивости конструкций.

“Лира 9.0” – программный комплекс для расчета и проектирования

конструкций. Реальная металлоконструкция перегружателя представлена в виде пространственной стержневой системы. Расчет выполнен на статические и динамические воздействия. Статические нагрузки моделируют силовые воздействия от сосредоточенных и распределенных сил и моментов. ПК “Лира” реализует численный метод дискретизации сплошной среды – метод конечных элементов (МКЭ). Основными этапами решения задач по МКЭ является синтез дискретной расчетной схемы на основе расчленения исследуемой системы на конечные элементы, построение матриц жесткости, формирование системы канонических уравнений, решение системы уравнений, вычисление значений узловых перемещений и определение компонентов напряженно-деформированного состояния исследуемой системы по перемещениям.

Расчетная схема металлоконструкции перегружателя ПМГ-20 представлена на рис.2.

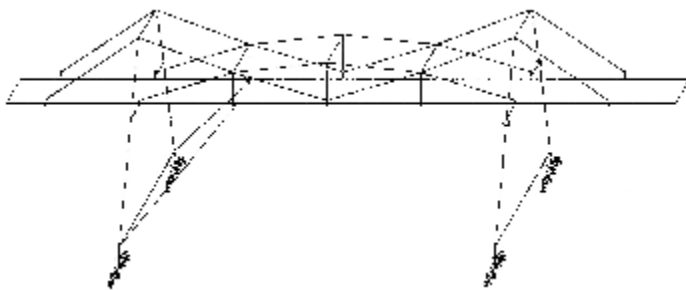


Рис. 2. Расчетная схема металлоконструкции перегружателя ПМГ-20

Материал конструкции – Сталь 09Г2С. Расчетное сопротивление материала R вычисляется как произведение нормативного сопротивления R^H на коэффициент однородности материала k , который учитывает опасность снижения способности материала сопротивляться внешним воздействиям вследствие изменчивости механических свойств

$$R = R^H k .$$

Расчет на прочность, выносливость и деформативность элементов металлоконструкции показал, что максимальные напряжения в металлоконструкции перегружателя не превышают расчетного сопротивления $\sigma_p = 248$ МПа, выносливость и деформативность обеспечиваются:

$$\sigma_{\max} < \sigma_p ;$$

$$\frac{\Delta f}{L} = \frac{47,5}{6000} = \frac{1}{1260} < \frac{1}{700} .$$

Прогибы консолей жесткой и шарнирной опор не превышают

допускаемых:

- для жесткой опоры $\frac{\Delta f}{L} = 0,0014 < 0,003$;
- для шарнирной опоры $\frac{\Delta f}{L} = 0,0022 < 0,003$.

Выводы и направление дальнейших исследований. Полученные в первом приближении результаты расчета металлоконструкции перегружателя свидетельствуют о том, что все элементы металлоконструкции удовлетворяют условию прочности и деформативности. В дальнейшем необходимо провести более детальный расчет, используя конечные элементы в виде пластин.

Список литературы. 1. Беглов Б.В. Мостовые перегружатели / Б. В. Беглов, П.И. Кох. – М.: Машиностроение, 1974. – 223 с. **2.** ПК ЛИРА. Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций / Под. ред. академика АИН Украины А. С. Городецкого. – К.: Машинознавство, 2003. – 464 с.

Поступила в редколлегию 06.05.2006.

УДК 539.3:621.98

Н.А. ДЕМИНА, Таврийская государственная агротехническая академия, г. Мелитополь

К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ШТАМПОВОЙ ОСНАТКИ

Запропонована нова багаторівнева структура комплексної математичної моделі напружено-деформованого стану елементів штампової оснастки. Розроблено структуру програмно-модельного комплексу для багатоваріантних досліджень процесів у технологічній системі холоднолистової штамповки.

The new multilevel structure of complex mathematical model of stressed-deformed state of elements of the stamp rigging is offered. The structure of programmatic-model complex is developed for multiple researches of processes in the technological system of cold stamping.

Состояние вопроса. Холоднолистовая штамповка [1, 2] является одним из наиболее прогрессивных технологических процессов, который обеспечивает оперативность и низкую стоимость технологической подготовки производства (ТПП) новых изделий, особенно при применении переналаживаемых штампов. При этом одним из основных вопросов является обеспечение прочности, жесткости, стойкости пуансонов, матриц, пуансон-матриц штампов. Этому вопросу посвящено

большое количество аналитических, численных и экспериментальных исследований, результаты которых достаточно точно отражены и обобщены в работе [3]. В то же время описанные ранее математические модели не отражают всех сторон исследуемого процесса, особенно с точки зрения описания контактного взаимодействия и процесса разделения штампуемого материала. Это обстоятельство и выдвигает актуальную и важную задачу разработки математической модели напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов штамповой оснастки, свободной от указанных недостатков. Однако, учитывая большой объем результатов, полученных с использованием ранее разработанных моделей и использованных в практике проектирования разделительных штампов, требуется создание такой модели, которая “выросла” бы из более простой и часто используемой. Этому вопросу, а также разработке структуры программно-модельного комплекса, реализующего создаваемую комплексную математическую модель с применением метода конечных элементов (МКЭ), посвящена данная статья.

Технология исследований. Предлагается следующая технология исследований напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки (рис.1).

Анализ конструкций, технологических параметров и условий эксплуатации элементов штамповой оснастки. Подобный анализ конструкций, условий взаимодействия элементов технологической оснастки и штампуемого материала методами голографической интерферометрии, электрогензметрии, фотоупругости описаны в работе [3]. Анализ этого материала позволяет сделать следующие выводы:

- в первом приближении для исследования НДС элементов штамповой оснастки возможно использование упрощенных расчетных моделей;
- уже имеются исходные экспериментальные материалы для идентификации расчетных моделей с учетом контактного взаимодействия;
- отсутствуют (за исключением “живых осциллограмм”) прямые экспериментальные исследования самого технологического процесса вырубki-пробивки на стадии разделения материала;
- наиболее нагруженными и ответственными элементами штампов являются пуансоны, матрицы, пуансон-матрицы и базовые плиты. Это значит, что в первую очередь именно их необходимо рассматривать с точки зрения разработки математических моделей напряженно-деформированного состояния, а также алгоритмического и программно-модельного обеспечения.

Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки. В соответствии с предлагаемой технологией исследований рассмотрены 3 варианта математических моделей, являющихся составными частями комплексной математической модели НДС

ЭЛЕМЕНТОВ ШТАМПОВОЙ ОСНАСТКИ.

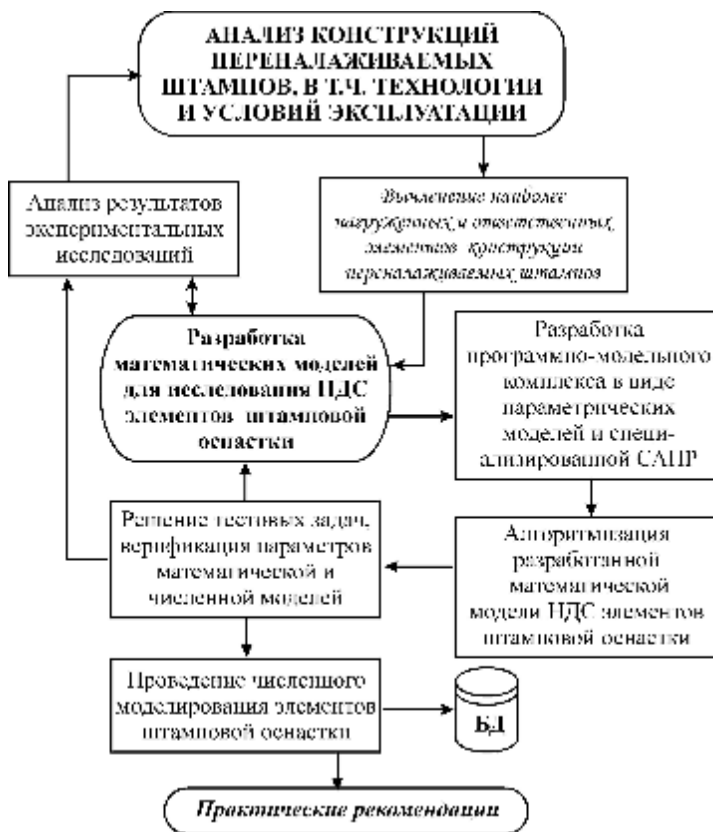


Рис.1. Предлагаемая технология исследований напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки

I. *Нижний уровень* представляет линейная модель, в которой предполагается известными и заданными законы распределения контактных усилий взаимодействия со штампуемым материалом и друг с другом. В этом случае задача сводится к трехмерной задаче теории упругости для тел с заданными площадками нагружения и известными законами распределения усилий. Так, в работах [3-7] достаточно полно представлен анализ условий нагружения элементов штамповой оснастки путем экспериментальных исследований методами электротензометрии, контактных отпечатков, фотоупругости и лазерной интерферометрии. Полученные результаты находятся в удовлетворительном соответствии с данными, полученными другими исследователями [8-11]. В результате для элементов штамповой

оснастки задаются достаточно простые законы распределения контактных усилий (рис.2).

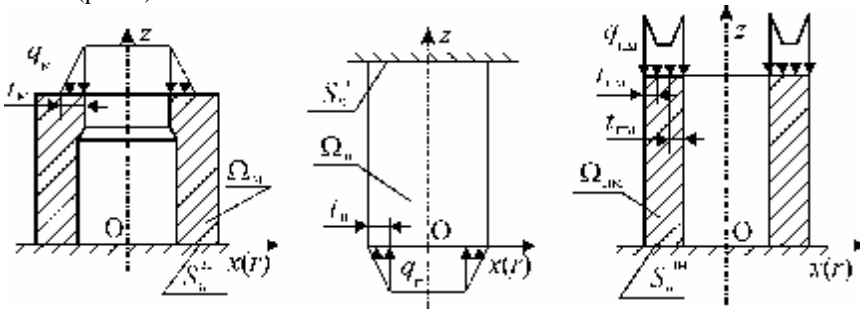


Рис.2. Расчетные схемы матрицы, пуансона и пуансон-матрицы для холоднolistовой штамповки

Система уравнений линейной теории упругости

$$L(u)|_{\Omega} = 0, \quad (1)$$

где L – оператор краевой задачи относительно искомых перемещений $u(\mathbf{r})$ (\mathbf{r} – радиус-вектор текущей точки области Ω , занимаемой исследуемым телом),

дополняется граничными условиями на частях S_u поверхностей пуансона, матрицы и пуансон-матрицы. В осесимметричном случае – это отрезки координатных линий $z = const$ (см. рис.2), с индексами “м” (матрица), “п” (пуансон), “пм” (пуансон-матрица), а также с условиями нагружения на участках в зоне рабочих кромок. На рис.2 приведены эти характерные отрезки: t_m (приложено линейное давление $q_m(r)$), t_p (приложено также линейно распределенное вдоль радиальной координаты давление q_p) и $t_{пм}, t_{пм}$ (приложено кусочно-линейное давление $q_{пм}$, причем на отрезках $t_{пм}, t_{пм}$ – линейное, вне – примерно постоянное).

Кроме указанных усилий, на режущие части штампов действуют интегрально менее значительные напряжения обжатия боковых поверхностей и еще меньшие тангенциальные напряжения, порождаемые трением [4]. Поскольку законы распределения данных нагрузок носят ярко выраженный локальный характер, причем зоны локализации – режущие кромки, то все эти силовые граничные условия можно сформулировать в терминах “кромочных” координат (рис.3):

$$\sigma_{zr}|_{r' < r'} = q(r'); \quad \sigma_{r'z}|_{z' < z'} = q_p(z'); \quad \tau_{r'z'}|_{z' < z'} = q_{\tau}(z'). \quad (2)$$

Учитывая, что [1-3]

$$\int_{(S)} (q + q_{\tau}) ds = P_{\text{шт}} , \quad (3)$$

где $P_{\text{шт}} = L_{\text{шт}} \sigma_{\text{ср}} t k_{\text{ш}}$ – усилие штамповки детали периметром $L_{\text{шт}}$ и толщиной t , изготовленной из материала с напряжениями среза $\sigma_{\text{ср}}$;

$k_{\text{ш}}$ – эмпирический коэффициент,

а также

$$\int_{(S)} q_n ds = \alpha \int_{(S)} q ds ; \quad (4)$$

$$q_{\tau} = \beta q_n = \text{const} , \quad (5)$$

можно определить все значимые коэффициенты в аналитических выражениях q , q_n , q_{τ} от координат, от конструктивных и технологических параметров элементов штампов. Здесь α, β – некоторые эмпирические коэффициенты.

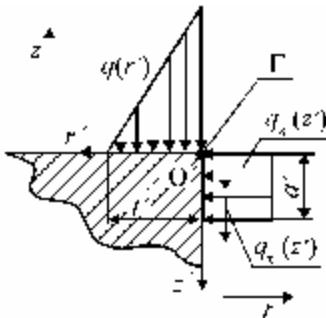


Рис.3. К формулировке силовых граничных условий в системе “кромочных” координат $O'r'z'$:
 Γ – режущая кромка;
 $q(r')$ – основное усилие штамповки;
 q_n, q_{τ} – усилия обжатия и трения

Соотношения (1)-(5) содержат описание классического варианта математической модели напряженно-деформированного состояния элементов штампов для холоднолистовой штамповки материала в системе “кромочных” координат. Незначительные количественные вариации этой модели могут быть вызваны только уточнением распределений q , q_n , q_{τ} , а также некоторых геометрических, силовых и технологических параметров, содержащихся в (2)-(5). Построенная в первом приближении математическая модель не вызывает принципиальных сложностей при последующей алгоритмизации, программной и модельной реализации. Основная же задача при создании, например, специализированной САПР для анализа напряженно-деформированного состояния элементов штампов на основе этой модели состоит в удачной параметризации всего набора значимых факторов.

II. Основной, наиболее заметный недостаток математической модели I состоит в раздельном рассмотрении режущих элементов штампов друг от

друга и от основного элемента технологической системы, их связывающего – от штампуемого материала. На рис.4 приведена схема такого взаимодействия, отнесенная к локальным “кромочным” координатам.

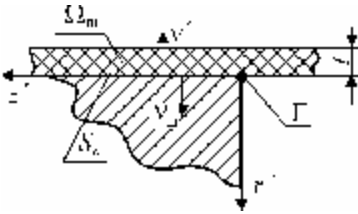


Рис.4. Схема взаимодействия режущего элемента штампа со штампуемым материалом:

$\Omega_{ш}$ – область пространства, занимаемая штампуемым материалом; S_c – зона возможного контактного взаимодействия; v', v_m – нормали к поверхностям режущего элемента и заготовки соответственно

Тогда, кроме системы уравнений (1), дополненной кинематическими граничными условиями на частях поверхности S_u , добавляются следующие условия на части поверхности возможного контакт (см. рис.4):

$$u_{v'} + u_{v_m} \leq \delta_c, \quad (6)$$

где $u_{v'}, u_{v_m}$ – перемещения точек режущего элемента и заготовки по нормальям к поверхностям; δ_c – начальный зазор в сопряжении.

При решении нелинейной задачи (1), (6) получаем не постулируемый заранее закон распределения контактных нагрузок q_c , а искомый закон их распределения в качестве еще одного неизвестного полученной задачи. При этом в качестве параметра нагружения можно взять или величину усилия штамповки

$$\int_{(S_c)} q_c ds = P_{шт}, \quad (7)$$

или величину хода ползуна прессы из некоторой нулевой точки Δ , и тогда

$$u|_{S_u} = \Delta. \quad (8)$$

Соотношение (7) задает силовое нагружение, а (8) – кинематическое.

Несмотря на кажущуюся простоту соотношения (6), заменяющего в данном случае уравнения (2)-(5), получаемая в результате задача становится более сложной, существенно нелинейной, причем в качестве дополнительных неизвестных выступают конфигурации контактных зон и распределения контактных нагрузок. Для решения таких задач используется, в частности, метод вариационных неравенств [12-14], сводящий ее к проблеме минимизации функционала полной внутренней энергии \mathcal{E} исследуемой системы тел на множестве, задаваемом ограничениями (6):

$$\mathcal{E}(u) \rightarrow \min. \quad (9)$$

Кроме перечисленных для варианта I при программной реализации данного варианта математической модели в качестве выходных параметров и данных должны выступать распределения q_c и значения t_m , t_{II} и $t_{пм}$. Сама задача анализа становится не только громоздкой, но и качественно сложнее, поскольку переводит задачу анализа напряженно-деформированного состояния в нелинейную постановку.

III. Следующим качественным шагом в формировании более адекватной математической модели напряженно-деформированного состояния элементов исследуемой системы является устранение того факта, что при изучении ее поведения никак не моделируется сам физический процесс, который является основой технологического процесса штамповки – процесс разделения штампуемого материала. В этом случае переходим от линейного оператора L в (1) к нелинейному $L^{(n)}$:

$$L^{(n)}(u, \Delta) = 0, \quad (10)$$

причем в нем присутствует и нелинейность геометрическая [15], и физическая [16], и структурная [17]. Кроме того, в операторе присутствует также параметр процесса Δ (например, ход ползуна прессы), от которого зависит текущее состояние нагруженности системы. Следует отметить, что обычно выбираемый для задания процесса штамповки параметр монотонно меняется во времени:

$$\dot{\Delta} > 0, \forall t > 0 \quad \text{или} \quad \dot{\Delta} < 0, \forall t > 0, \quad (11)$$

т.е., например, имеем случай монотонного активного нагружения без участков разгрузки. Последнее замечание отнюдь не упрощает задачу, поскольку наряду с этим идет сопутствующий процесс разрушения материала, вносящий наибольший вклад в усложнение модели.

Развертывание соотношения (10) требует описания в первую очередь свойств материалов элементов исследуемой системы при упруго-пластическом деформировании и разрушении. Указанные зависимости во многом определяют и качественные, и количественные характеристики исследуемого процесса.

Таким образом, записываемая соотношением (10) модель оказывается наиболее сложной из всех, однако ожидаемо более адекватно описывающей поведение исследуемой системы. При алгоритмической и программной ее реализации в дополнение к характеристикам, отслеживаемым для моделей I и II, появляется необходимость в контроле всех характеристик процесса от величины параметра Δ .

Структура программно-модельного комплекса. В соответствии с описанной выше структурой математической модели строится и программно-

модельная реализация. Она включает, с одной стороны, интегрированные специализированные модули создаваемой САПР, а с другой – параметризованные расчетные модели (при использовании МКЭ – конечно-элементные модели). Посредством интерфейсного модуля эти части программно-модельного комплекса взаимодействуют с универсальными системами САЕ, а также с модулями параметрического анализа (рис.5). В результате может быть создана база данных решений (БД на рис.5), служащая основой для построения базы знаний в области моделирования, анализа и синтеза элементов штамповой оснастки.



Рис.5. Структура программно-модельного комплекса

Заключение. Предложенный подход отличается от предлагаемых ранее другими исследователями следующими качественными особенностями:

1. Созданные варианты математических моделей повторяют в своем развитии диалектический процесс, реализованный для исследования в данном случае напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки: от простых моделей – к сложным и более адекватно описывающим исследуемый процесс, причем с сохранением и дополнением позитивных качеств моделей низших уровней в моделях высших.

2. Модели разных уровней могут опираться на достаточно широкую базу данных экспериментальных исследований элементов штамповой оснастки.

3. Предложенная структура программно-модельного комплекса в целом отражает структуру комплексной математической модели.

4. Предложенная иерархическая структура математических моделей и программно-модельного комплекса соединяет: преемственность, адекватность, оперативность, параметричность, а также единый сквозной

подход.

5. В целом прогнозируются основные закономерности напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки – матриц, пуансонов, пуансон-матриц: локализация нагрузок, и, соответственно, напряжений в зоне режущих кромок.

6. Математическая модель наиболее высокого уровня, в отличие от остальных, дает возможность не только исследовать напряженно-деформированное состояние оснастки, но и напряженно-деформированное состояние заготовки, в том числе остаточное деформирование детали, форму ее кромки, усилие штамповки.

В дальнейшем планируется проведение многовариантных исследований напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки с варьированием наиболее важных и значимых конструктивных, технологических и эксплуатационных параметров штампов.

Список литературы. 1. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. – М.: Машиностроение, 1979. – 520 с. 2. Скворцов Г.Д. Основы конструирования штампов для холодной листовой штамповки. – М.: Машиностроение, 1972. – 360 с. 3. Зяярненко Е.И. Разработка математических моделей и расчеты на прочность разделительных переналяживаемых штампов. – Дисс. на соиск. уч. ст. докт. техн. наук. – Харьков. – 1992. – 418 с. 4. Зяярненко Е.И., Ткачук А.В., Ткачук Н.А. Расчеты на прочность вырубных матриц и пуансон-матриц для листовой штамповки // Кузнечно-штамповочное производство – 1990. – с.18-21. 5. Зяярненко Е.И., Ткачук А.В., Ткачук Н.А. Исследование напряженного состояния вырубных пуансонов УСПШ // В сб.: Прогрессивная технология, переналяживаемая оснастка и инструмент. Материалы отраслевого научно-технического семинара. – Харьков. – 1985. – С.95-103. 6. Зяярненко Е.И., Ткачук А.В., Ткачук Н.А. Исследование контактного взаимодействия пуансона со штампуемым материалом. – Вестник Оборонной Техники. Серия 2, 1985. – Вып.10(176). – С.20-23. 7. Зяярненко Е.И., Ткачук А.В., Ткачук Н.А. Исследование напряженного состояния вырубных пуансонов УСПШ // В сб.: Прогрессивная технология, переналяживаемая оснастка и инструмент. Материалы отраслевого научно-технического семинара. – Харьков, 1985, С.95-103. 8. Артюхов В.П., Савченко В.И. Исследования распределения напряжений в рабочих элементах вырубных штампов методом фотоупругости. // Кузнечно-штамповочное производство, 1970. – № 11. – С.24-27. 9. Елистратов В.И. Исследование нормальных напряжений по торцу твердосплавных пуансонов при вырубке-пробивке. // Кузнечно-штамповочное производство, 1973. – № 8. – С.21-24. 10. Львов Г.И., Ткачук Н.А. Моделирование и анализ элементов технологических систем листовой штамповки // Механика та машинобудування. – 1997.– №1. – С.34-39. 11. Ткачук Н.А., Орлов Е.А., Головченко В.И., Гоголь Н.А. Экспресс – модели и экспресс – системы для оперативного решения задач анализа и синтеза элементов сложных механических систем // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Тематичний випуск: “Машинознавство та САПР”. Збірник наукових праць НТУ “ХПІ”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2005.– № 53. – С.116-137. 12. Кравчук А.С. К задаче Герца для линейно- и нелинейно-упругих тел конечных размеров// Прикладная математика и механика. – 1977. – Том. 41. – с.329-337. 13. Львов Г.И. Взаимодействие упругопластической оболочки с жестким штампом // Прикладная механика. – 1980. – Том. 16. – № 11. 14. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. - М.: Мир, 1987. – 542 с. 15. Лурье А.И. Теория упругости. – М.: Наука, 1970. – 940 с. 16. Зукас Дж.А., Николас Т., Свифт Х. Р., Гришук Л.Б., Куран Д.Р. Динамика удара. – М.: Мир, 1985. – 296 с. 17. Музейник А.Ю., Богач А.А. Математическое моделирование процесса удара и взрыва в программе LS-DYNA: учебное пособие. – Пенза: Информационно издательский центр ПГУ, 2005. – 106 с.

Поступила в редакцию 25.04.06

А.К. ДУКА, канд. техн. наук, *Н.К. РЕЗНИЧЕНКО*, канд. техн. наук,
Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков

ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ ДЕТАЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ АСИММЕТРИЧНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Визначена еквівалентна магнітна проникність феромагнітних деталей при індукційному нагріві та показаний її вплив на характеристики робочого процесу.

Equivalent permeance of ferromagnetic details at the induction heating is determined. And its influence on characteristics of working process is shown

Введение. Индукционному нагреву (ИН) посвящено много работ, причем в большей их части рассматривается применение высокотемпературного ИН в металлургической промышленности, где он используется для плавки, закалки и придания пластичности материалу при штамповке и ковке [1, 2, 3], при этом ферромагнитные детали зачастую нагреваются до температуры выше точки Кюри. Нагрев деталей технологических соединений при их сборке или разборке токами промышленной или повышенной частоты относится к низкотемпературному нагреву, и, обладая рядом несомненных преимуществ перед другими видами нагрева, в наибольшей степени подходит для технологий, формирующих ответственные соединения (колесные пары рельсового транспорта, узлы нефтепромысловых и подъемных машин, гребные валы с облицовкой в судостроении и т.д.).

Анализ упомянутой литературы показывает, что до настоящего времени не существует подробных и доказательных представлений о физических явлениях в индукционных нагревателях и нагреваемых телах. Большинство авторов исходит из представления о нагреве детали возникающими в материале вихревыми токами, индуктируемыми электромагнитным полем переменной частоты. Вместе с тем ясно, что система “индукционный нагреватель – деталь” является термо-электромагнитным преобразователем и, как всякий преобразователь, состоит из двух частей:

- 1) индуктора – возбудителя электромагнитного поля;
- 2) преобразователя – нагреваемого тела, в котором энергия электромагнитного поля превращается в тепловую.

Основной процесс этого энергопреобразования лишь косвенно связан с возникновением вихревых токов, влияющих на распределение плотности рабочего тока по сечениям нагреваемой детали. Основным процессом генерирования теплоты является прямой нагрев эквивалентного сопротивления, когда нагреваемая деталь включена в цепь вторичного рабочего тока путем магнитной связи [2]. Действие вихревых токов при ИН в более явном виде проявляется в случае, когда индуктор дополняется элементами концентрирования и конфигурирования электромагнитного поля.