

УДК 621.98:512.55 (076)

Тузенко О.А.<sup>1</sup>, Кухарь В.В.<sup>2</sup>, Лаврентик А.И.<sup>3</sup>, Балалаева Е.Ю.<sup>4</sup>

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АППРОКСИМАЦИЯ ФУНКЦИЙ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕНИЙ В ДЛИННОМЕРНЫХ ПРЕСС-ШТЕМПЕЛЯХ

*Разработаны математическая модель и программное обеспечение для определения оптимальных конструктивных и технологических параметров процесса прессования, позволяющие обеспечить безопасные напряжения и деформации в пресс-штемпеле.*

В настоящее время одной из наиболее нагруженных деталей кузнечно-прессового оборудования является пресс-штемпель. Исследование работы системы «пресс-штамп» показали, что напряжение – важнейшая характеристика процесса деформирования пресс-штемпеля [1], зависящая от множества конструктивных параметров установок и технологических режимов их работы. Определить степень влияния каждого фактора сложно, а иногда практически невозможно. В связи с этим возникает необходимость определения оптимальных параметров системы, при которых нагрузка на исполнительные органы не будет превышать максимально допустимых значений.

Предлагаемая работа направлена на разработку модели расчета, позволяющей определить напряжение в пресс-штемпеле в зависимости от его конструктивных параметров и выбранного режима работы установки, оценить влияние каждого параметра и принять конкретное решение. Математическое описание процесса деформации позволит значительно сократить временные затраты на построение зависимостей при различных параметрах эксперимента.

Цель работы – построение математических моделей и программного обеспечения, на основании которых можно анализировать влияние каждого параметра на напряжение, возникающее в пресс-штемпеле, а также получение различных уравнений регрессии, что позволит оптимизировать технологические параметры процесса прессования, повысить точность, снизить паразитные деформации в рабочих и основных узлах оборудования, замедлить износ инструмента и направляющих.

В работах [1, 2] проведен теоретический анализ работы пресс-штемпелей с компенсатором продольного изгиба для определения величины деформации в зависимости от момента реакции, а, следовательно, от величины предварительного напряжения упругого элемента компенсатора. Составленное уравнение моментов было решено аналитически, в результате чего получены выражения для определения величины угла поворота переднего конца пресс-штемпеля, ординаты опасного сечения и наибольшего изгибающего момента.

При разработке конструкции системы «пресс-штамп» с упругими компенсаторами необходимо рационально подобрать основные конструктивные и технологические параметры для обеспечения требуемого напряжения, возникающего в пресс-штемпеле, которое не должно превышать максимально допустимое значение. В связи с этим возникает необходимость получения аппроксимирующих зависимостей напряжения в пресс-штемпеле от различных параметров.

Общий вид исследуемой зависимости относительного напряжения прочности:

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_{kp}} = f(d, \varepsilon_1, \sigma_n, m, \varphi_k, P_d, M_p), \quad (1)$$

<sup>1</sup>ПГТУ, канд. техн. наук, доц.

<sup>2</sup>ПГТУ, канд. техн. наук, доц.

<sup>3</sup>ПГТУ, ст. преп.

<sup>4</sup>ПГТУ, аспирант

где  $\sigma_p$  – напряжение прочности [МПа],  $\sigma_{kp}$  – критическое напряжение прочности [МПа],  $d$  – диаметр пресс-штемпеля [мм],  $\varepsilon_1$  – отношение длины передней цилиндрической части пресс-штемпеля к его диаметру,  $\sigma_n$  – напряжение сжатия [МПа],  $m$  – отношение диаметра осевого отверстия в пресс-штемпеле к его диаметру,  $\varphi_k$  – угол расхождения осей [рад],  $P_d$  – поперечная сила [Н],  $M_p$  – момент реакции [Н·мм].

На основании экспериментальных данных подбирается вид аппроксимирующих зависимостей.

Уравнения регрессии для различных параметров имеют следующий вид:

$$\sigma_p / \sigma_{kp} (d) = k_1 \cdot e^{k_2 d + k_3} + k_4, \quad (2)$$

$$\sigma_p / \sigma_{kp} (\varepsilon_1) = k_5 \cdot e^{k_6 \varepsilon_1 + k_7} + k_8, \quad (3)$$

$$\sigma_p / \sigma_{kp} (\sigma_n) = k_9 \cdot \sigma_n + k_{10}, \quad (4)$$

$$\sigma_p / \sigma_{kp} (m) = k_{11} \cdot e^{k_{12} m + k_{13}} + k_{14}, \quad (5)$$

$$\sigma_p / \sigma_{kp} (\varphi_k) = k_{15} \cdot \varphi_k + k_{16}, \quad (6)$$

$$\sigma_p / \sigma_{kp} (P_d) = k_{17} \cdot P_d + k_{18}, \quad (7)$$

$$\sigma_p / \sigma_{kp} (M_p) = k_{19} \cdot M_p + k_{20}, \quad (8)$$

где  $k_1, k_2, \dots, k_{20}$  – искомые коэффициенты, определяемые в зависимости от исходных данных методом перебора [3], не требующим значительных вычислительных ресурсов и обладающим достаточно высокой точностью.

Для проверки модели на адекватность определена стандартная ошибка по формуле [4]:

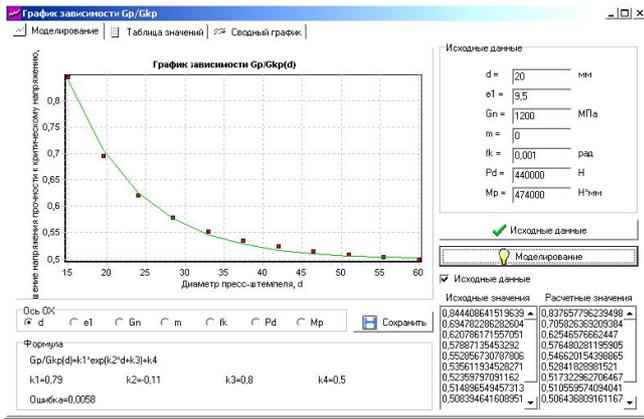
$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - Y_i)^2}{N}}, \quad (9)$$

где  $y_i$  – заданные значения;  $Y_i$  – значения коэффициента заполнения, полученные по уравнениям регрессии (2) – (8);  $N$  – количество значений.

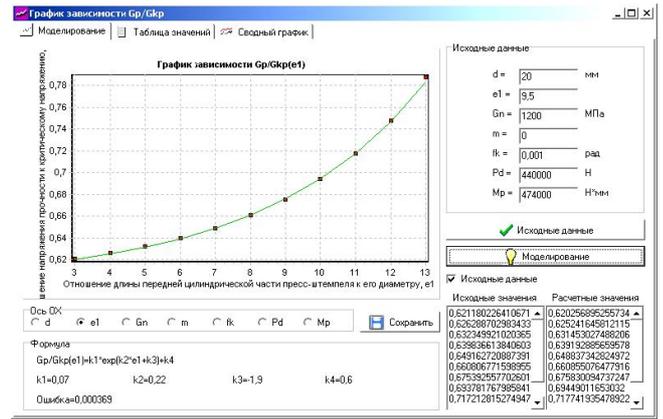
На основе математических моделей разработано программное обеспечение, позволяющее вводить исходные данные, производить расчет напряжения в пресс-штемпеле в зависимости от различных параметров, сравнивать полученные значения, рассчитывать ошибку и строить линии регрессии. Входные, промежуточные и выходные данные отображаются в виде отдельных числовых значений, таблиц, рисунков, схем и графиков. Также существует возможность построения сводного графика с одновременным отображением до десяти зависимостей возникающего напряжения от одного из параметров. При необходимости некоторые графики можно не отображать. За счет уменьшения количества экспериментов упрощается методика расчета. При этом зависимости можно построить, зная лишь несколько контрольных точек.

Наглядные результаты работы программы представлены на графиках  $\sigma_p / \sigma_{kp}$  от  $d$ ,  $\varepsilon_1$ ,  $\sigma_n$ ,  $m$ ,  $\varphi_k$ ,  $P_d$ ,  $M_p$  (рис. 1а – 1ж), где отображены исходные данные, уравнения регрессий, полученные коэффициенты, а также рассчитанная ошибка.

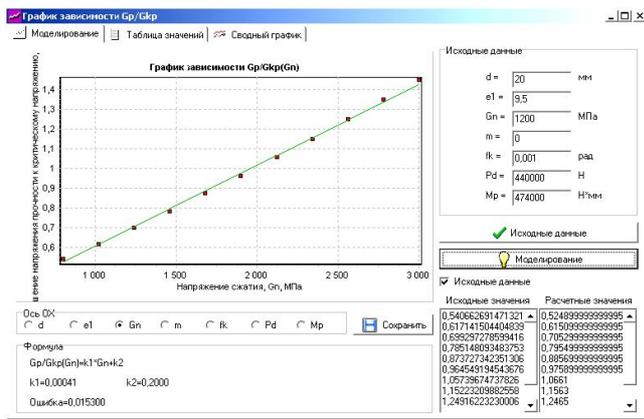
Используя данный подход возможно получение полного представления о влиянии различных параметров на напряжение прочности. Нормальная работа пресс-штемпеля характеризуется отношением напряжения к критическому напряжению, не превышающему 1. Следовательно, анализируя график  $\sigma_p / \sigma_{kp} (\sigma_n)$  (рис. 1в), можно сделать вывод, что при значениях напряжения сжатия свыше 1900 МПа произойдет поломка оборудования. Остальные графики иллюстрируют нормальный режим работы пресс-штемпеля.



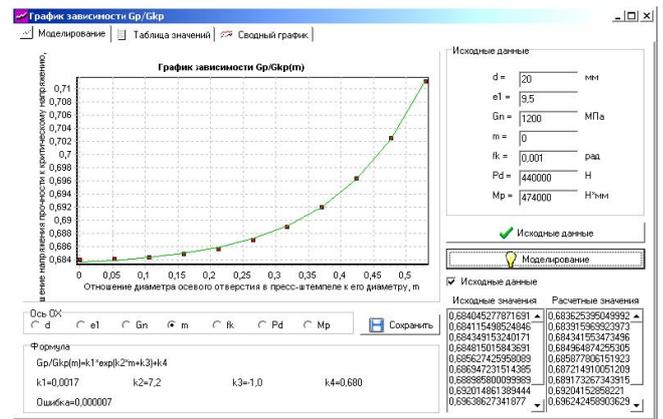
а)



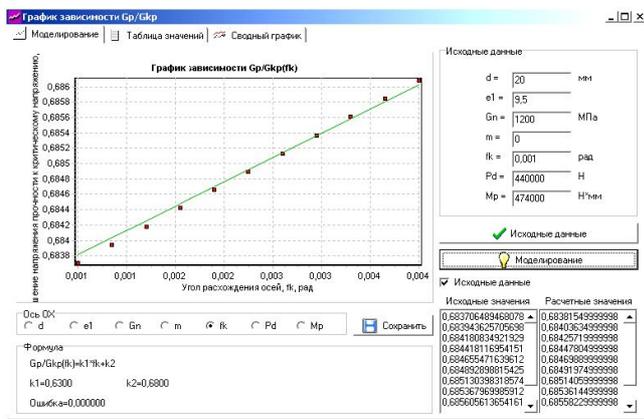
б)



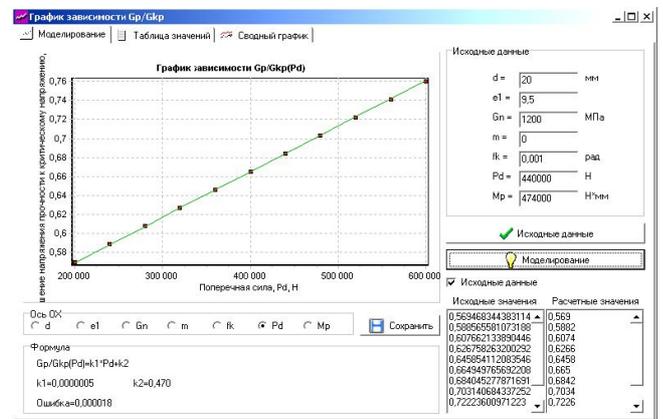
в)



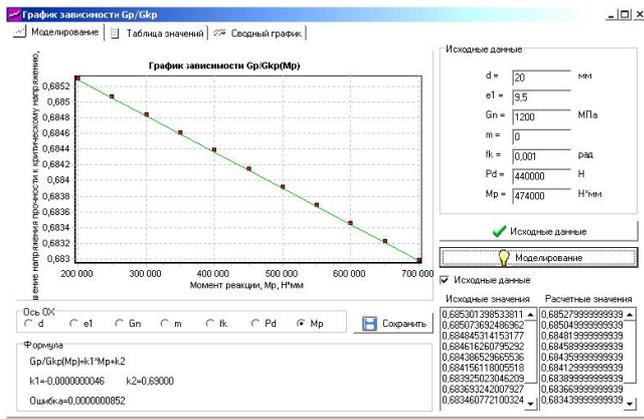
г)



д)



е)



ж)

Рис. 1 – Результаты моделирования – зависимость относительного напряжения прочности от:  
 а) диаметра пресс-штемпеля;  
 б) отношения длины передней цилиндрической части пресс-штемпеля к его диаметру;  
 в) напряжения сжатия;  
 г) отношения диаметра осевого отверстия в пресс-штемпеle к его диаметру;  
 д) угла расхождения осей;  
 е) поперечной силы;  
 ж) момента реакции

График  $\sigma_p/\sigma_{кр}(\varepsilon_1)$  (рис. 1б) подтверждает предположение, что возможная потеря устойчивости конструкции пресс-штемпеля обусловлена его длинномерностью, т. е. с увеличением отношения длины пресс-штемпеля  $l$  к его диаметру  $d$  относительное напряжение возрастает по экспоненциальной зависимости с резким увеличением относительного напряжения с ростом отношения  $\varepsilon_1 = l/d$ . Одним из возможных путей снижения напряжений в пресс-штемпеле является увеличение его внешнего диаметра  $d$ , что иллюстрирует график  $\sigma_p/\sigma_{кр}(d)$  (рис. 1а), или уменьшение (и даже исключение) диаметра внутреннего отверстия  $d_0$  согласно графику  $\sigma_p/\sigma_{кр}(m)$ , где  $m = d_0/d$ . Однако такое решение неоправданно повышает металлоемкость конструкции, а, следовательно, не является рациональным. Анализ графиков  $\sigma_p/\sigma_{кр}(\sigma_n)$  и  $\sigma_p/\sigma_{кр}(P_d)$  (рис. 1в, 1е) показывает, что с увеличением напряжения сжатия  $\sigma_n$  и поперечной силы  $P_d$  относительное напряжение в пресс-штемпеле возрастает по линейной зависимости, что обусловлено зависимостью величин  $\sigma_n$  и  $P_d$  от технологического усилия операции. Из графика  $\sigma_p/\sigma_{кр}(\varphi_k)$  (рис. 1д) можно сделать вывод, что с увеличением угла расхождения осей (угол разворота ползуна) напряжение в пресс-штемпеле линейно возрастает. Эффективность введения момента реакции  $M_p$  объясняется графиком зависимости  $\sigma_p/\sigma_{кр}(M_p)$  (рис. 1ж), согласно которому с увеличением величины  $M_p$  снижается значение напряжения в пресс-штемпеле, что требует подбора конструктивных параметров компенсатора с необходимым моментом реакции.

Анализ полученных результатов (рис. 1а – 1ж) позволил сделать вывод о правильности работы системы и адекватности полученной математической модели.

В дальнейшем возможна разработка модуля программного обеспечения для получения в автоматическом режиме оптимальных характеристик работы системы «пресс-штамп» с использованием упругих компенсаторов различных конструкций, подбор и корректировка параметров модели.

#### Выводы

1. Построена математическая модель и разработано программное обеспечение, позволяющее строить уравнения регрессии и находить зависимости напряжения, возникающего в пресс-штемпеле, от различных параметров, что дает возможность определять оптимальные конструктивные и технологические характеристики системы.
2. Использование данных моделей дает возможность более корректно обрабатывать экспериментальные данные, а также ускорить процесс обработки информации.

#### Перечень ссылок

1. Блинник М.С. О прочности пресс-штемпелей / М.С. Блинник, В.В. Магазинер // Кузнечно-штамповочное производство. – 1983. – № 4. – С. 13 – 16.
2. Кухарь В.В. Аналитическое исследование работы пресс-штемпелей с компенсаторами продольного изгиба / В.В. Кухарь, О.А. Лаврентик // Захист металургійних машин від поломок: Зб. наук. пр. – Маріуполь, 2005. – Вип. 8. – С. 114 – 119.
3. Математическая модель определения параметров порошковой ленты / О.А. Лаврентик, В.В. Чигарев, А.Г. Белик, М.Р. Манукьян // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту: Зб. наук. пр. – Маріуполь, 2006. – Вип. 16. – С. 136 – 139.
4. Ханк Д.Э. Бизнес-прогнозирование / Д.Э. Ханк, Д.У. Уичерн, А. Дж. Райтс. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 635 с.

Рецензент: Ю.Е. Коляда  
д-р физ.-мат. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 10.03.2009