

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВИБРОДОРНОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ ЦИЛИНДРОВ

*Г.С. Жетесов, Т.Ю. Никонова, Д.Ш. Уалиев,  
С.К. Бийжанов, Е.А. Митрофанова, А.Сагитов*  
*Карагандинский государственный технический университет*  
*г. Караганда, Казахстан*

### **Аннотация**

Проведен анализ эффективности имитационного моделирования, которая может оцениваться рядом критериев, в том числе точностью и достоверностью результатов моделирования. Предложен проведение численного исследования напряженно-деформированного состояния деформируемых заготовок и инструментов в условиях их изготовления и эксплуатации на основе современных подходов с использованием определяющих соотношений пластичности и упругости. Описан метод применения программного продукта конечно-элементного анализа DEFORM 3D для моделирования напряженно-деформированного состояния.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, модель, эксперимент, вибродорнование, поверхностное пластическое деформирование, упрочнение.

### **Введение**

При имитационном моделировании так же, как и при любом другом методе анализа и синтеза системы, весьма существенен вопрос его эффективности. Эффективность имитационного моделирования может оцениваться рядом критериев, в том числе точностью и достоверностью результатов моделирования, временем построения и работы с моделью, затратами машинных ресурсов.

Как правило, имитационные модели (ИМ) содержат случайные события, величины, процессы. Поэтому моделирование

представляет собой выборочные эксперименты, анализ результатов которых имеет статистические аспекты [1].

При исследовании свойств модели необходимо установить диапазон изменения отклика модели при изменении каждой компоненты вектора параметров. В зависимости от диапазона изменения откликов определяется стратегия планирования экспериментов на ИМ. Если при значительной амплитуде изменений некоторой компоненты вектора параметров модели отклик меняется незначительно, то это

означает, что точность представления этой компоненты в ИМ не играет существенной роли. Кроме того, в планировании имитационных экспериментов эта компонента не будет использоваться как основная. Если же отклик модели окажется

### **Материалы и методика исследований**

Одним из основных приемов решения задачи обеспечения качества является создание оптимальных термомеханических параметров процесса для максимального использования природных деформационных свойств стали и сплавов, а также реализация более совершенных схем напряженно-деформированного состояния (НДС) металла при формоизменении. Определение характеристик НДС расчетным или расчетно-экспериментальным путем по очагу деформации позволяет применять современные модели прогнозирования для количественной оценки поврежденности металла макродефектами. Однако на данный момент методы расчета НДС носят приближенный, полуэмпирический характер, основанные на методах теории пластичности, сопротивления материалов и не пригодны для точной оценки качества заготовок и конструирования инструмента. В связи с этим требуется проведение

высокочувствительным к изменению некоторой компоненты вектора, то это указывает на необходимость представления ее в модели с максимально возможной точностью.

численного исследования НДС деформируемых заготовок и инструментов в условиях их изготовления и эксплуатации на основе современных подходов с использованием определяющих соотношений теории пластичности и упругости [2].

Исследование НДС заготовки в процессе вибродорнования. Для моделирования НДС применили программный продукт конечно-элементного анализа DEFORM 3D.

Заготовка представляет собой полый цилиндр со следующими размерами (рисунок 1): диаметр внешний 60 мм, диаметр внутренний 42 мм, высота 260 мм. Для продолжения расчета произведем мешинг, в результате которого получаем заготовку с необходимым количеством элементов.

Прототипирование заготовки и оправки производилось программой DEFORM 3D, инструмента программным комплексом Unigraphics (рисунок 2).



Рисунок 1 - Визуализация прототипирования



Рисунок 2 - Генерация сетки и элементов для расчета

Далее находим число элементов и узлов для моделирования путем разделения полученных значений (рисунок 3).

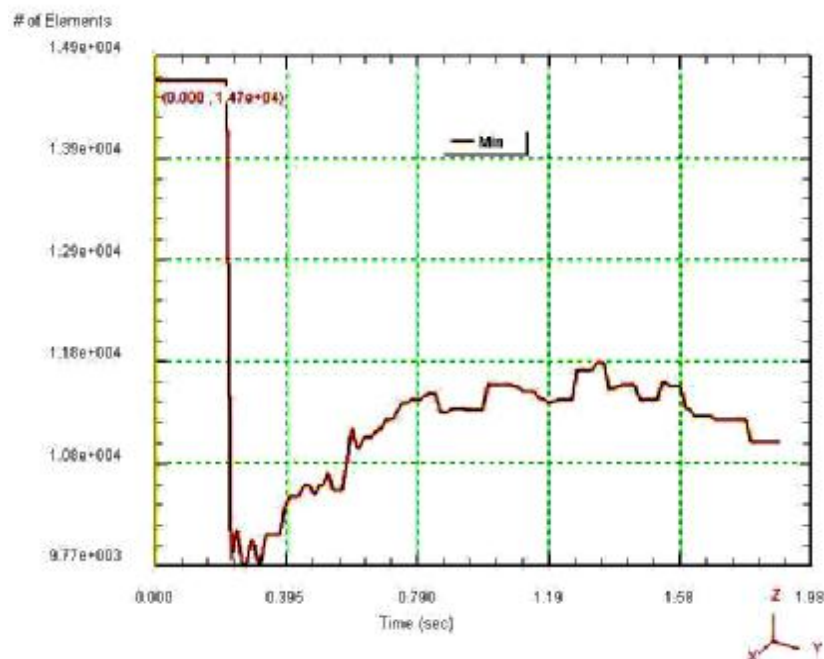


Рисунок 3 – Выбор числа элементов для моделирования

Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния процесса вибродорнования отверстия цилиндра представлены на рисунках 4, 5, 6, 7, 8.

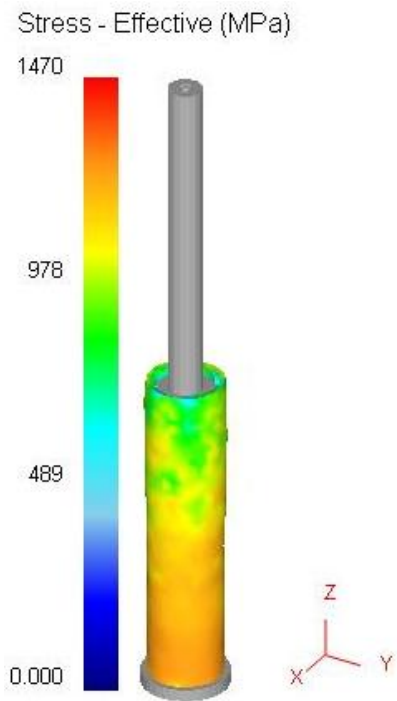


Рисунок 4 – Картина объемного распределения эквивалентных напряжений в цилиндре при вибродорновании

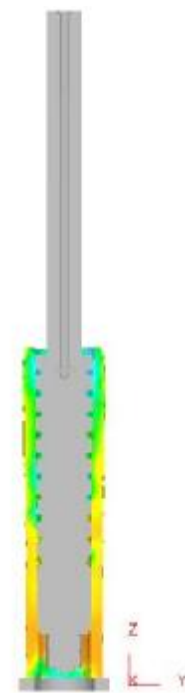


Рисунок 5 - Картина распределения эквивалентных напряжений по плоскости XY в гидроцилindre при вибродорновании

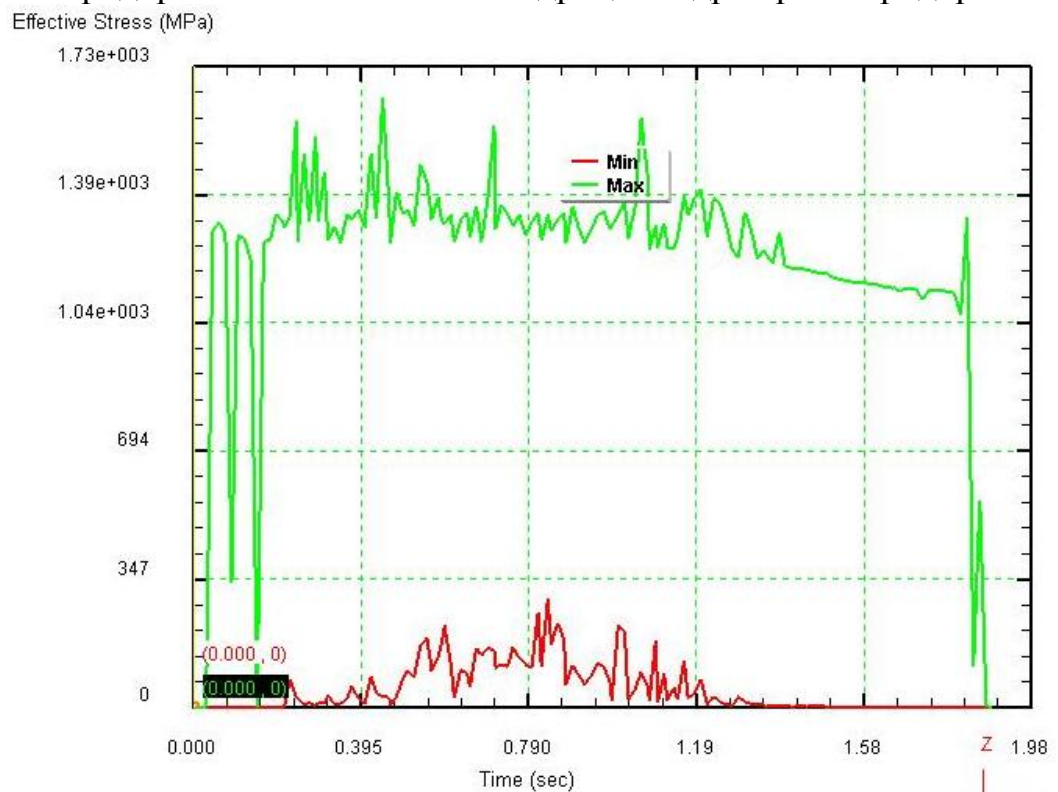


Рисунок 6 – Распределение действительных напряжений в теле цилиндра по времени

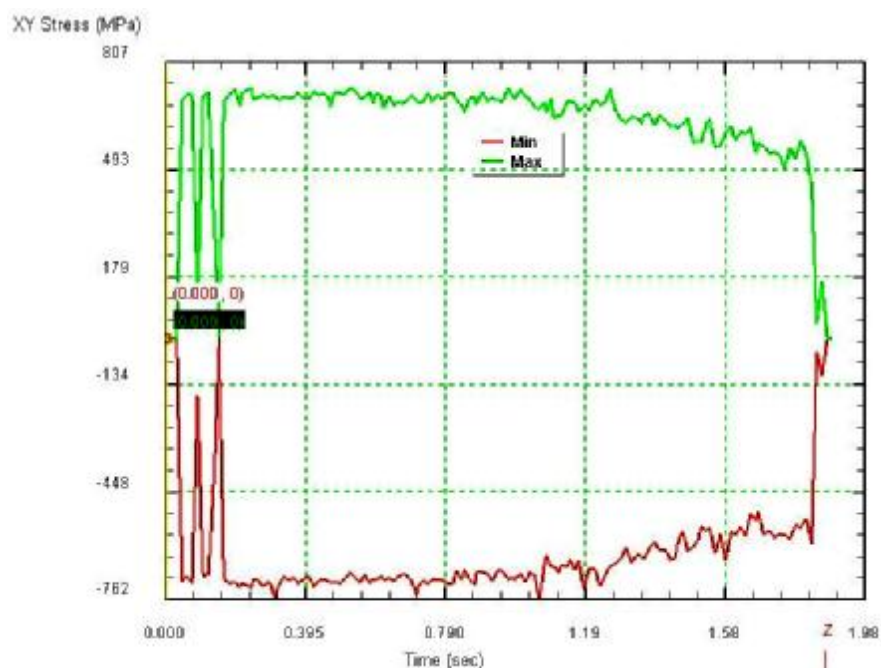


Рисунок 7 - Распределение действительных напряжений в теле цилиндра по плоскости XY

Как видно из распределения НДС, результаты моделирования хорошо согласуются с теоретическими и экспериментальными данными. Для выявления остаточных напряжений, возникающих в заготовке применим теорию разгрузки предложенную Ильюшином А.А. [3, 4]. На основании теоремы о разгрузке следует, что для определения остаточных напряжений, деформаций и перемещений,

возникающих в цилиндре после разгрузки необходимо: вычислить истинные напряжения, деформаций и перемещения, в ней возникающие от заданных нагрузок по законам пластичности; вычислить фиктивные напряжения в ней от действия тех же нагрузок на основании закона Гука.

Находим фиктивное напряженное состояние и перемещение при заданных силах  $P_a, P_b, P$ .

$$S_1^\phi = -\frac{P}{s} \frac{a}{r} + \frac{signc}{\sqrt{3}} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) (\sqrt{e_{ia}^2} - e^2)^{(e)}; \quad (1)$$

$$S_2^\phi = -\frac{P}{s} \frac{a}{r} + \frac{signc}{\sqrt{3}} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) (\sqrt{e_{ia}^2} - e^2)^{(e)}; \quad (2)$$

$$S_2^\phi = -\frac{P}{s} \frac{a}{r} + \frac{signc}{\sqrt{3}} (\sqrt{e_{ia}^2} - e^2)^{(e)} - e^{(e)}. \quad (3)$$

При этом входящие сюда величины с индексом «e» наверху относятся к случаю упругой задачи и определяются соотношениями при  $\lambda=0$ :

$$(\sqrt{e_{ia}^2} - e^2)^{(e)} = p, e^{(e)} = q. \quad (4)$$

Для упрощения выражений остаточных напряжений целесообразно в формулах (2, 3, 4) произвести замену указанных величин (p, q) [5].

Применяя теорему о разгрузке, находим остаточные напряжения:

$$\sigma_{10} = \frac{signc}{\sqrt{3}} \frac{\hat{e}^{ei} w(e_i) e_i de_i}{\hat{e}^{ia} \sqrt{e_i^2 - e^2}} + \frac{1 + \frac{a^2}{r^2}}{(1 - a^2)^{eib}} \frac{e^{ia} w(e_i) e_i de_i}{\sqrt{e_i^2 - e^2}}; \quad (5)$$

$$\sigma_{20} = \frac{signc}{\sqrt{3}} \frac{\hat{e}^{ei} w(e_i) e_i de_i}{\hat{e}^{ia} \sqrt{e_i^2 - e^2}} + \frac{1 + \frac{a^2}{r^2}}{(1 - a^2)^{eib}} \frac{e^{ia} w(e_i) e_i de_i}{\sqrt{e_i^2 - e^2}} - \frac{2a^2 signc}{r^2 \sqrt{3}} \sqrt{e_{ia}^2 - e^2} w(e_i); \quad (6)$$

$$s_{10} = \frac{signc}{\sqrt{3}} \frac{\hat{e}^{ei} w(e_i) e_i de_i}{\hat{e}^{ia} \sqrt{e_i^2 - e^2}} + \frac{1}{(1 - a^2)^{eib}} \frac{e^{ia} w(e_i) e_i de_i}{\sqrt{e_i^2 - e^2}} - \frac{\hat{e}}{e r \sqrt{3} \sqrt{e_{ia}^2 - e^2}} signc - e^{eib} w(e_i) - \frac{a^2 e}{(1 - a^2)} \sqrt{e_{ia}^2 - e^2} - e^{eib} \frac{e^{ia} w(e_i) e_i de_i}{(e_i^2 - e^2)^{3/2}}. \quad (7)$$

То есть необходимо вычислить соотношение пластической и упругой деформации.

Соотношение пластической и упругой деформации вычисляются по соотношению объема в начале деформации, в максимальной

деформации и после возврата упругой деформации. Подставляя в уравнения (1, 2, 3) коэффициенты упругопластической деформации получаем остаточные напряжения в любой точке цилиндра показанные на рисунке 8.

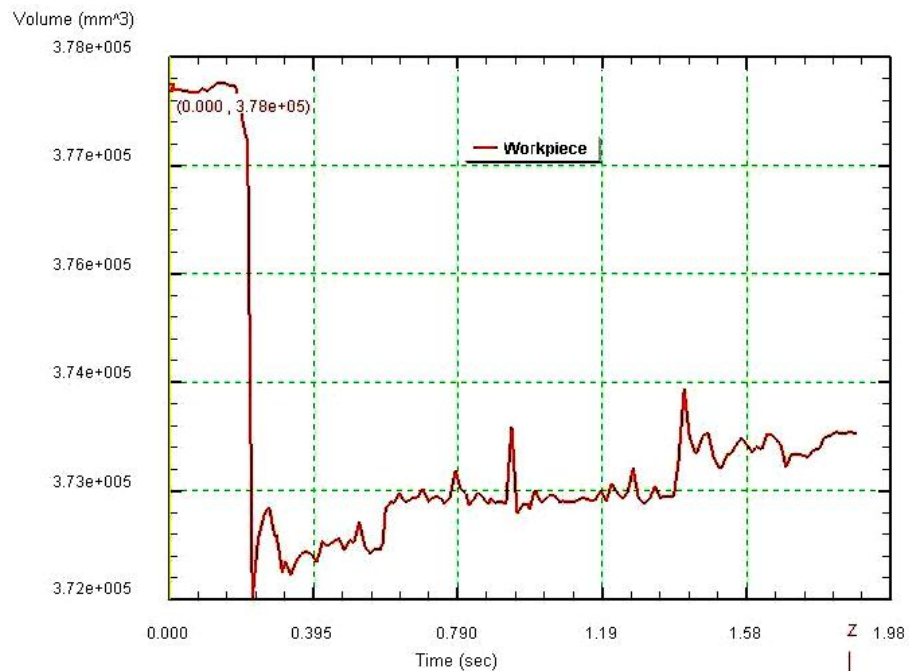


Рисунок 8 – Изменение объема цилиндра по времени

Как видно из эпюры максимальное значение распределения остаточных сжимающих и растягивающих напряжений в зависимости от угла заборного конуса (рисунок 9) имеют следующее значение 0,7 и -1,1 МПа.

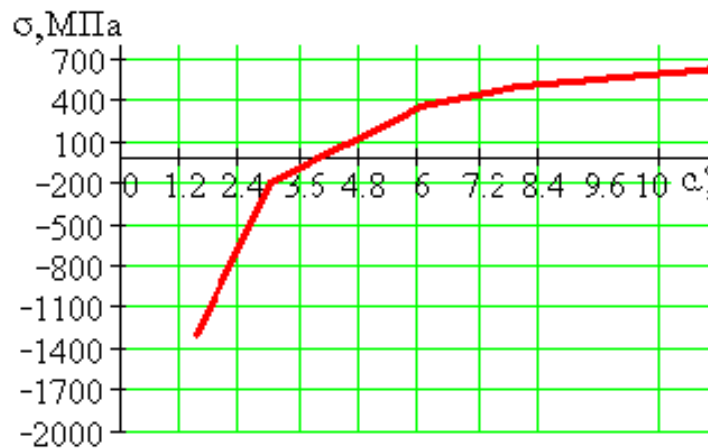


Рисунок 9 - Зависимость величины остаточных напряжений ( $\sigma$ ) от угла заборного конуса ( $\alpha$ )

Объем заготовки в начале деформации  $V_1=3,78 \times 10^5 \text{ м}^3$ .

Объем заготовки в максимальной деформации  $V_2=3,71 \times 10^5 \text{ м}^3$ .

Объем заготовки после возврата упругой деформации  $V_3=3,73 \times 10^5 \text{ м}^3$ .

Соответственно коэффициент упругопластической деформации равен:

$$e=(V_1-V_2)/V_3= 0,02.$$

Вводя данные из графика напряженно-деформированное состояние для стали 45 по

плоскости XY (рисунок 9) и применяя теорему о разгрузке, находим остаточные напряжения

по касательной к телу заготовки в точке  $r=0,04$  м:

$$\sigma_T = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{628(0,02)0,02}{\sqrt{0,02^2 - 0^2}} + \frac{1 + \frac{1,7^2}{0,04^2}}{(1 - 628^2)} \frac{628(0,02)0,02}{\sqrt{0,02^2 - 0,02^2}} = 1,3 \text{ МПа.}$$

Соответственно максимальное остаточное напряжение по положительной оси равно 1,3 МПа, для отрицательной оси уравнение теряет физический смысл. Поэтому ограничимся сравнением

максимального значения оси по положительной оси и экспериментально полученного значения.

Коэффициент расхождения равен соответственно:

$$K_p = (\sigma - \sigma_T) / \sigma = 0,07$$

### Заключение

Проведено исследование качества поверхностного слоя после процесса вибродорнования отверстий цилиндров методом конечных элементов. Целью такого моделирования является получение простого, удобного для анализа линейного уравнения, связывающего варьируемые факторы входа с фактором отклика или выходным параметром. Линейное уравнение позволяет в явном виде анализировать влияние факторов на выходной параметр и может быть использовано как основа для описания качества исследуемого процесса. Следует

исходить из того, что при узком диапазоне варьирования факторов линейного уравнения достаточно точно отображает закономерности процесса.

Исходя из этого следует, что экспериментальные данные и полученная математическая модель процесса вибродорнования являются адекватными. Расхождение составляет 7%. Соответственно теоретическое обоснование процесса полностью обосновано и подтверждено с помощью имитационного моделирования в среде программы DEFORM 3D.

### Список литературы:

1. Карпов Ю. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. - СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 400С.
2. Строгалев В. П., Толкачева И. О. Имитационное моделирование. — МГТУ им. Баумана, 2008. — 800С.
3. Ильюшин А.А. Пластичность. Упругопластические деформации. М.-Л.: Гостехиздат, 1948. - 376 С.



4. Ильюшин А.А. О связи между напряжениями и малыми деформациями в механике сплошных сред // ПММ. 1954. Т. 18. Вып. 6. С. 641-666.

5. Ильюшин А.А. Пластичность. Основы общей математической теории // - М.: Изд-во АН СССР, 1963.- 271 С.

### **Түйін**

Имитациялық үлгілеу кезінде, басқа да жүйені талдау және сараптау әдістері сияқты, тиімділік мәселесі маңызды болып келеді. Имитациялық үлгілеудің тиімділігі бірқатар критериялармен, оның ішінде үлгілеу нәтижелерінің дәлдігі мен дұрыстығымен, үлгімен тұрғызу мен жұмыс істеу уақытымен, машиналық қорлар уақытымен анықталады. Осындай үлгілеудің мақсаты болып сараптау үшін қарапайым, қолайлы сызықтың теңдеу алу болып табылады. Дірілді-дорналау процесінің тәжірибелік мәліметтері мен алынған математикалық үлгінің айырмашылығы 7% құрайды.

### **Summary**

Simulation modeling as well as with any other method of analysis and synthesis systems very important questions of its effectiveness. The efficiency of simulation modeling can be evaluated a number of criteria, including accuracy and reliability of the simulation results, the time of construction and work with the model, the cost of machine resources. The purpose of this simulation modeling is to provide a simple, easy to analyze the linear equation. The discrepancy between the experimental data and the resulting mathematical model of vibromandrelling process is 7%.