

Упрочнение насосных штанг с учетом стохастического распределения пластических свойств материала

М. Б. Гитман¹, В. Ю. Столбов, А. Н. Надымов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

¹ gmb@matmod.pstu.ac.ru

Рассматривается задача оптимизации процесса упругопластического растяжения с кручением насосной штанги при стохастической неопределенности начальных пластических свойств материала. В вероятностной форме формулируются условия прочности штанги с учетом наводимых остаточных напряжений и деформационного упрочнения материала. Задача решается с помощью метода Монте-Карло. Найденные оптимальные режимы процесса восстановления свойств штанги хорошо соответствуют экспериментальным данным.

Ключевые слова: упрочнение, упругопластическое растяжение с кручением, насосная штанга, стохастическая оптимизация.

Введение. В настоящее время для нефтедобывающих предприятий является актуальной проблема поиска технологий восстановления подземного оборудования, особенно насосных штанг. Отработанные штанги переплавляются или выбрасываются. Скопление большого количества бывших в эксплуатации штанг – дополнительный источник экологической опасности в нефтедобывающих регионах. Восстановление насосной штанги не только продлевает срок ее службы, но и приводит к существенной экономии. Поэтому разработка методов восстановления работоспособности бывших в эксплуатации штанг – важная и актуальная задача современной нефтедобывающей промышленности.

Существующая технология восстановления насосных штанг [1] позволяет воссоздать пространственную геометрию и одновременно упрочнить тело штанги, бывшей в эксплуатации. Процесс восстановления включает два этапа: продольную пластическую деформацию насосной штанги до определенной величины и ее кручение в напряженном состоянии. Параметры процесса упрочнения обычно подбираются опытным путем и зависят от материала, вида термической обработки и размеров штанги. При этом не всегда учитывается возможное неоднородное распределение механических свойств по длине штанги, что в ряде случаев приводит к образованию шеек в процессе деформирования и снижению усталостной прочности.

Случайные неоднородные механические свойства закладываются как во время изготовления насосных штанг (выплавка стали, изготовление калиброванного прутка, высадка головок, термическая и механическая обработка, правка), так и при их эксплуатации (различные геологотехнические условия эксплуатации штанг, разные динамические уровни жидкости в скважинах, режимы работы скважинной штанговой насосной установки, профили скважин [2]).

Рассмотрим процесс восстановления насосных штанг только с точки зрения их упрочнения при сложном нагружении. Показано [3], что появляющиеся после разгрузки остаточные напряжения благоприятно влияют на дальнейшую работоспособность штанги за счет повышения ее коррозионной и усталостной прочности.

Учитывая, что начальные пластические свойства материала насосных штанг неоднородны по длине и носят случайный характер, невозможно экспериментально подобрать параметры процесса упрочнения, оптимальные для всех штанг. Нахождение таких параметров для каждой штанги является достаточно трудоемкой задачей. Поэтому возникает необходимость постановки и решения задачи стохастической оптимизации для групп штанг в зависимости от заданных вероятностных законов распределения начальных пластических свойств материала по длине штанги. При этом считается, что все штанги, бывшие в эксплуатации, можно предварительно разбить на группы, определяемые заводом-изготовителем, маркой стали, годом изготовления и диаметром, которые указаны на маркировке штанги. Общая постановка задачи стохастической оптимизации процесса пластического деформирования металла приведена в работе [4]. Примеры решения некоторых частных задач стохастической оптимизации даны в [5]. Оптимизация процесса упрочнения насосной штанги имеет свои особенности и требует более детального исследования.

Постановка задачи. В качестве параметров оптимизации процесса упрочнения насосных штанг выбраны следующие величины: x_1 характеризует остаточное удлинение штанги после растяжения; x_2 – то же вследствие кручения. Выбор этих величин обусловлен, во-первых, тем, что они имеют ясный механический смысл и, во-вторых, могут быть найдены с достаточно высокой точностью из одной кривой $F - \Delta L$, которая характеризует процесс нагружения штанги, состоящий из растяжения (участок $0-A$), кручения ($A-B$) и разгрузки (рис. 1). Точка A на рис. 1 определяет момент прекращения процесса растяжения штанги, по ней несложно найти величину остаточного удлинения x_1 , точка B – момент прекращения процесса кручения, при котором усилие снижается до некоторой величины F^* за счет перераспределения напряжений в теле штанги (рис. 1). По точке B можно однозначно определить остаточное удлинение x_2 (рис. 1). Величины x_1, x_2 легко контролируются при деформировании штанг и задаются в качестве параметров управления процессом упрочнения.

Заметим, чем меньше остаточные удлинения, тем меньшие пластические деформации претерпит штанга, следовательно, меньшим дополнительным повреждениям будет подвергаться ее материал. Поэтому в качестве критерия оптимизации выберем остаточное удлинение штанги после деформирования, которое можно характеризовать суммой параметров $x_1 + x_2$ и которое желательно минимизировать при выполнении ограничений на прочность штанги.

После упрочнения материала штанги в процессе деформирования наименьшее значение предела текучести по телу штанги должно быть не меньше заданной величины:

$$\min_{r, z \in V} \sigma_s(r, z) \geq \sigma^*, \quad (1)$$

где r – расстояние от продольной оси штанги; z – координата на оси; V – объем, занимаемый телом штанги.

Кроме того, для повышения коррозионной прочности штанги в ней необходимо создать поле благоприятных остаточных продольных напряжений, которые можно описать характерной эпюрой (рис. 2).

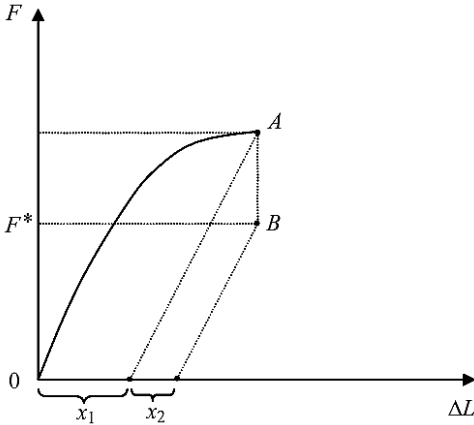


Рис. 1

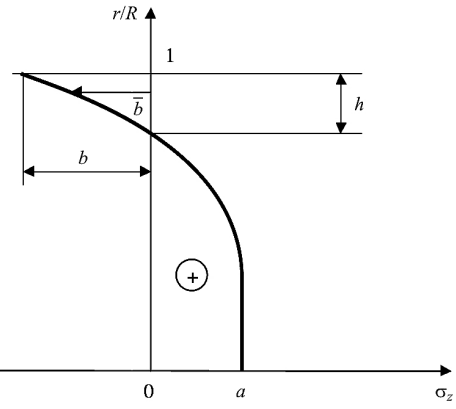


Рис. 2

Рис. 1. Зависимость усилия растяжения F от удлинения штанги ΔL .

Рис. 2. Характерная эпюра остаточных продольных напряжений (a , b и h – параметры, зависящие от процесса деформирования).

Из рис. 2 видно, что во внешнем слое после деформирования возникают сжимающие остаточные напряжения, которые повышают коррозионную стойкость и прочность штанги, поскольку при эксплуатации снижаются растягивающие напряжения. Во внутреннем слое растягивающие напряжения, напротив, увеличиваются, но это с точки зрения прочности штанги не так опасно, так как здесь нет контакта с коррозионной средой. Согласно [3] критерий коррозионной прочности можно записать в следующем виде:

$$\sqrt{\sigma_{\max} \sigma_a} \leq [\sigma], \quad \sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2, \quad (2)$$

где σ_{\max} , σ_{\min} – максимальное и минимальное значение продольных напряжений за цикл нагружения штанги.

С учетом остаточных напряжений ограничение (2) можно переписать так:

$$\begin{aligned} \sqrt{(\sigma_{\max} - \bar{b}) \sigma_a} &\leq [\sigma]_1, & r \in [R - h, R], \\ \sqrt{(\sigma_{\max} + a) \sigma_a} &\leq [\sigma]_2, & r \in [0, R - h], \end{aligned} \quad (3)$$

где \bar{b} – модуль равнодействующей сжимающих напряжений, который с достаточной степенью точности можно считать равным $2b/3$; $[\sigma]_1$ – допусти-

мое напряжение для материала, находящегося в коррозионной среде; $[\sigma]_2$ – то же для полированного образца на воздухе; R – радиус штанги.

Последние два ограничения (3) относительно величин a и b перепишем следующим образом:

$$a(z) \leq \frac{[\sigma]_2^2}{\sigma_a} - \sigma_{\min}, \quad b(z) \geq \frac{3}{2} \left[\sigma_{\max} - \frac{[\sigma]_1^2}{\sigma_a} \right], \quad \forall z \in [0, L], \quad (4)$$

где L – длина штанги; a – величина сжимающих продольных остаточных напряжений на поверхности штанги; b – величина растягивающих продольных остаточных напряжений в теле штанги.

Поскольку устойчивость штанги к внешним коррозионным воздействиям определяется также толщиной h слоя сжимающих напряжений, введем ограничение на эту толщину:

$$h(z) \geq h^*, \quad \forall z \in [0, L]. \quad (5)$$

На основании статистического анализа некоторой выборки из группы штанг [2] можно выдвинуть гипотезу о законах распределения механических характеристик по длине для данной группы. Зная законы распределения характеристик, можно попытаться найти такие параметры управления процессом упрочнения, при которых для большинства штанг из группы остаточные напряжения были бы благоприятными. Все вышеперечисленные ограничения записаны для конкретной штанги. Однако ввиду того что характеристики материала штанг заданы вероятностными законами распределения, ограничения должны быть записаны в соответствующей форме. Процесс упрочнения представляется случайной величиной ω , определяемой реализацией пластических свойств конкретной штанги. Тогда критерий оптимизации в общем случае – это случайная функция $f(x_1, x_2, \omega)$ [4]. В данном случае $f(x_1, x_2, \omega) = x_1 + x_2$, так как вектор управления определяется не для конкретного процесса упрочнения отдельно выбранной насосной штанги, а для некоторой группы штанг.

Теперь постановка задачи стохастической оптимизации процесса упрочнения бывших в эксплуатации насосных штанг состоит в следующем.

Найти вектор $\hat{x} = (\hat{x}_1, \hat{x}_2)$ такой, что

$$x_1 + x_2 \rightarrow \min \quad (6)$$

при ограничениях

$$P(h(z) \geq h^*) \geq P^*, \quad \forall z \in [0, L]; \quad (7)$$

$$P\left(a(z) \leq \frac{[\sigma]_2^2}{\sigma_a} - \sigma_{\min}\right) \geq P^*, \quad \forall z \in [0, L]; \quad (8)$$

$$P\left(b(z) \geq \frac{3}{2} \left[\sigma_{\max} - \frac{[\sigma]_1^2}{\sigma_a} \right]\right) \geq P^*, \quad \forall z \in [0, L]; \quad (9)$$

$$P\left(\min_{r, z \in V} \sigma_s(r, z) \geq \sigma^*\right) \geq P^*, \quad \forall z \in [0, L]; \quad (10)$$

$$x_1 \geq 0, \quad x_2 \geq 0, \quad (11)$$

где P – вероятность выполнения ограничения для группы штанг; P^* – заданная предельная вероятность.

Отметим, что деформационное упрочнение материала штанги и распределение остаточных напряжений в зависимости от режимов ее нагружения описываются с помощью математической модели процесса растяжения с кручением неоднородного упругопластического стержня [6].

Метод решения задачи. Поставленная задача стохастической оптимизации (6)–(11) решалась методом покоординатного спуска [7] совместно с методом Монте-Карло [8, 9]. С использованием метода покоординатного спуска осуществлялась минимизация целевой функции (6), по методу Монте-Карло определялись вероятностные ограничения (7)–(10). При этом на каждом шаге метода оптимизации многократно решалась прямая задача моделирования процесса нагружения при всех возможных случайных распределениях пластических свойств материала по длине штанги по разработанной модели [6].

Исходные данные задачи стохастической оптимизации получены следующим образом. Из группы штанг были отобраны несколько для измерения пределов текучести, модулей упругости и модулей деформационного упрочнения. Измерения проводились на двадцати шести участках, на которые штанга была разбита по длине. Принималось, что на каждом участке механические свойства материала штанги являются однородными. Статистический анализ полученных данных показал, что закон распределения величины предела текучести на каждом участке можно считать нормальным, а остальные характеристики материала – детерминированными [2].

Плотность нормального распределения предела текучести материала на каждом участке аппроксимировалась кусочно-постоянной функцией. Для определения границ интервала аппроксимации предела текучести использовалось «правило трех сигм» [10]. Решая прямую задачу растяжения и кручения штанги с помощью разработанной модели [6], можно получить значения остаточных напряжений в ее теле и распределение предела текучести, входящие в ограничения (7)–(10). Если они будут удовлетворять заданным ограничениям, то вероятность этого конкретного процесса упрочнения (ω) добавится к вероятности выполнения ограничений для всей группы. Выбрав значения параметров оптимизации и смоделировав процесс упрочнения для каждого набора пластических свойств по длине штанги (все возможные комбинации), определим, выполняются ли вероятностные ограничения (7)–(10) при данных параметрах. Если нет, выбираем новые значения параметров оптимизации до тех пор, пока не достигнем минимума целевой функции при выполнении всех ограничений задачи. Отметим, что ограничения (11) выполняются автоматически в результате выбора допустимых отрезков изменения параметров оптимизации.

Анализ результатов. Приведем исходные данные и полученные результаты для группы штанг радиусом $R = 11$ мм и длиной $L = 7,8$ м из низкоуглеродистой легированной стали. Начальные значения математических ожиданий и среднеквадратичных отклонений предела текучести для участков однородности штанг показаны на рис. 3.

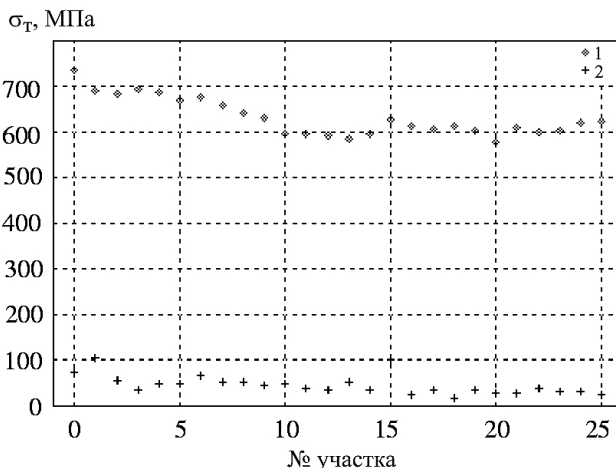


Рис. 3. Значения математических ожиданий (1) и среднеквадратичных отклонений (2).

Значения входящих в ограничения (7)–(10) параметров следующие: $h^* = 0,1$, $P^* = 0,95$, $\sigma^* = 630$ МПа, $[\sigma]_1 = 216$ МПа, $[\sigma]_2 = 67,5$ МПа, $\sigma_{\max} = 118$ МПа, $\sigma_{\min} = 26,3$ МПа.

В результате решения задачи стохастической оптимизации получены такие значения параметров управления процессом упрочнения штанги: $\hat{x}_1 = 1$ мм, $\hat{x}_2 = 7$ мм. Проверка этих значений путем моделирования процесса деформирования с использованием начальных пластических свойств нескольких реальных штанг показала, что во всех случаях в их теле появлялись остаточные продольные напряжения, которые удовлетворяют ограничениям (4), (5).

В настоящее время для данной группы штанг используются более “мягкие” режимы нагружения: $x_1 = 1$ мм, $x_2 = 4$ мм. Проведенный расчет для среднестатистической штанги из исследуемой группы (предел текучести на каждом из участков равен математическому ожиданию) свидетельствует о том, что оптимальные режимы процесса – $x_1 = 1$ мм, $x_2 = 3,8$ мм близки к экспериментально подобранным [11]. Однако в этом случае не выполняется вероятностное ограничение для прочности штанги (9), что хорошо видно из рис. 4.

Таким образом, полученные экспериментальным путем режимы упрочнения насосных штанг, бывших в эксплуатации, являются, по сути, режимами для среднестатистических штанг и не учитывают весь возможный разброс начальных характеристик материала. Поскольку нас интересует восстановление каждой штанги, необходимо, чтобы процесс упрочнения происходил по полученным теоретическим режимам, которые более “жесткие”, но гарантируют требуемое упрочнение практически для всех штанг данной группы.

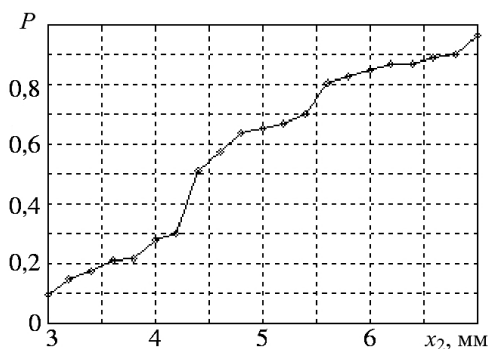


Рис. 4. Зависимость вероятности P выполнения ограничения (9) для группы штанг от значения величины остаточного удлинения x_2 .

Выводы

1. Представлена постановка задачи стохастической оптимизации процесса упрочнения насосных штанг, бывших в эксплуатации. С математической точки зрения задача сводится к задаче оптимизации параметров нагружения штанги при вероятностных ограничениях на ее прочностные характеристики.

2. Для решения задачи предложен метод покоординатного спуска в сочетании с методом Монте-Карло. В качестве прямой задачи используется задача деформирования неоднородного стержня при растяжении и последующем кручении.

3. Приведены результаты решения задачи для одной из групп штанг, бывших в эксплуатации.

4. Показано, что для обеспечения выполнения всех заданных прочностных ограничений необходимо “ужесточить” режимы процесса упрочнения штанги по сравнению с существующими, подобранными эмпирическим путем.

Работа выполнена при государственной поддержке развития кооперации вузов и промышленных предприятий.

Резюме

Розглядається задача оптимізації процесу пружно-пластичного розтягування з крученням насосної штанги за стохастичної невизначеності початкових пластичних властивостей матеріалу. В імовірнісній формі формулюються умови міцності штанги з урахуванням залишкових напружень і деформаційного зміцнення матеріалу. Задача розв’язується за допомогою методу Монте-Карло. Отримані оптимальні режими процесу відновлення властивостей штанги знаходяться в хорошій відповідності з експериментальними даними.

1. Патент RU 2126842 C1. Способ упрочнения длинномерных цилиндрических изделий / В. В. Семенов, Н. П. Надымов. – Опубликовано. 27.02.1999.
2. Надымов А. Н., Гитман М. Б., Столбов В. Ю. Исследование стохастического распределения механических характеристик насосных штанг после эксплуатации // Изв. Тул. гос. ун-та. – 2000. – Вып. 1. – С. 452 – 459.

3. Романов В. В. Влияние коррозионной среды на циклическую прочность металлов. – М.: Наука, 1969. – 220 с.
4. Gitman M. B., Trusov P. V., and Fedoseev S. A. On the stochastic optimization problems of plastic metal-working processes // J. Math. Sci. – 1997. – **84**, No. 3. – P. 1109 – 1112.
5. Gitman M. B., Trusov P. V., and Fedoseev S. A. On optimization of metal forming with adaptable characteristics // Korean J. Comput. Appl. Math. – 2000. – **7**, No. 2. – P. 387 – 396.
6. Надымов А. Н., Столбов В. Ю., Трусов П. В. Математическое моделирование процесса восстановления насосных штанг // Сиб. журн. индустр. математики. – 2002. – **5**, № 1. – С. 120 – 126.
7. Himmelblau D. M. Applied Nonlinear Programming. – New York: McGraw-Hill, 1972. – 560 p.
8. Metropolis N. and Ulam S. The Monte Carlo method // J. Amer. Stat. Assoc. – 1949. – **44**, No. 247. – P. 335 – 341.
9. Roger E. Stan Ulam, John von Neumann, and the Monte Carlo Method. – Los Alamos Science, 1987. – Special Issue. – P. 131 – 141.
10. Feller W. An Introduction to Probability Theory and Its Applications. – New York; Chichester; Brisbane; Toronto: John Wiley and Sons, 1970. – 580 p.
11. Надымов А. Н. Моделирование и оптимизация процесса восстановления насосных штанг: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2002. – 182 с.

Поступила 10. 10. 2012