

С. 40—47.— (Изв. высш. учеб. заведений). [5]. Слепко И. И., Адамовский Н. Г. Исследование усилий в несущем канате однопролетной установки при подтягивании груза со стороны // Лесн. журн.— 1978.— № 6.— С. 49—54.— (Изв. высш. учеб. заведений).

Поступила 8 апреля 1985 г.

УДК 630*377.44.001.2

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ НА МАТЕРИАЛОЕМКОСТЬ ЛЕСНЫХ МАШИН

В. С. КРАЛИН

Уральский лесотехнический институт

Материалоемкость и надежность — важные показатели эффективности любой машины. Например, уменьшение материалоемкости валочно-трелевочных машин (ВТМ) ЛП-17 и ЛП-49 на 5% позволит повысить их производительность в среднем на 20%, а низкая надежность ВТМ снижает производительность до 30% [4].

Один из наиболее эффективных путей увеличения надежности и снижения массы машин — использование материалов с повышенными механическими характеристиками. Однако возрастание прочности имеет разумный предел, ограничиваемый экономическими соображениями. Поэтому важно знать точное количественное влияние этой характеристики на массу и надежность машины, так как интуитивная оценка принимаемых решений зачастую ошибочна.

Цель данной статьи — количественный и качественный анализ влияния механических характеристик применяемых материалов на материалоемкость лесных машин при заданном уровне их надежности. Была использована математическая модель оптимального проектирования (ОП) навесных гидроманипуляторов (ГМ) лесотранспортных машин. В качестве примера рассмотрен ГМ валочно-трелевочной машины ВП-80.

Кратко остановимся на формулировке задачи ОП и особенности задания целевой функции и уравнений ограничений. Для этого рассмотрим стрелу ГМ ВП-80, общий вид которой представлен на рис. 1.

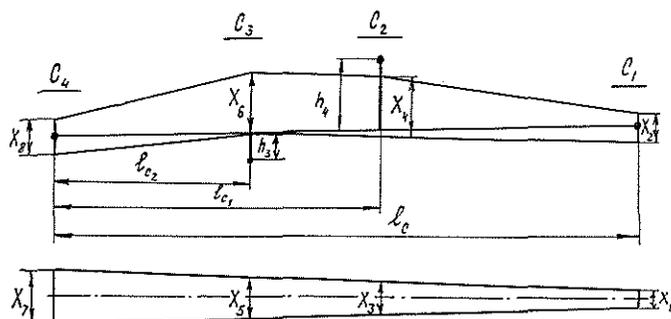


Рис. 1. Общий вид стрелы гидроманипулятора валочно-трелевочной машины ВП-80.

Первым и важнейшим этапом задачи ОП является выбор и обоснование показателей эффективности. В нашем случае принимаем единственный показатель эффективности — массу металлоконструкции стрелы при заданном ограничении на вероятность безотказной работы

(ВБР). Согласно приведенной на рис. 1 схеме, для стрелы ГМ ВП-80 целевая функция имеет следующий вид:

$$m_c = \sum_{i=1}^n F_i l_i \gamma, \quad (1)$$

где F_i — площадь i -того сечения стрелы ГМ, м²;

l_i — длина i -того элемента ГМ, м;

γ — плотность материала, из которого изготовлен ГМ, кг/м³.

Запишем в общем виде независимые переменные, входящие в целевую функцию (1), которые образуют вектор конструктивных параметров:

$$X_{<m>} = \langle X_1, X_2, \dots, X_8, t, l_c, l_c, l_c, h_3, h_4 \rangle, \quad (2)$$

где X_1, \dots, X_8 — ширина и высота расчетных сечений стрелы ГМ, м;

t — толщина материала, из которого изготовлен ГМ, м;

l_c, h_i — координаты шарнирных соединений стрелы ГМ, м.

Совокупность независимых переменных, образующих вектор конструктивных параметров, можно представить в виде множества:

$$\{X\}_m = \{X_i\}_n \cup \{X_a\}_l, \quad (3)$$

где $\{X_i\}_n$ — множество параметров, варьируемых по условию задачи (параметры управления), м;

$\{X_a\}_l$ — множество параметров, которые не варьируются по условию задачи (параметры состояния), м.

Для стрелы ГМ ВП-80 компонентами вектора управления $X_{<n>}$ являются геометрические характеристики поперечных сечений C_i : ширина X_i и высота X_{i+1}

$$X_{<n>} = \langle X_1, X_2, \dots, X_8 \rangle. \quad (4)$$

Областные (гипероктантные) ограничения устанавливаются на основании конструктивных соображений и для ГМ ВП-80 их можно записать так:

$$\begin{cases} 0,05 \leq X_1 \leq 0,5; \\ \dots \dots \dots \\ 0,05 \leq X_8 \leq 0,5. \end{cases} \quad (5)$$

В качестве функциональных ограничений принята вероятность безотказной работы R для каждого из дискретных, расчетных сечений стрелы ГМ, которая имеет общий вид:

$$R = P(r > \sigma) = P(r - \sigma > 0), \quad (6)$$

где r — характеристика несущей способности конструкции, МПа;

σ — действующие напряжения, МПа.

В представленной постановке задача ОП может быть сформулирована в виде монокритериальной, многопараметрической задачи нелинейного программирования (НП) при нелинейном характере целевой функции и ограничений. Найти

$$\min m_c = \min f(X_1^*, X_2^*, \dots, X_8^*) \quad (7)$$

$$X_i^* \in D$$

при ограничениях

$$R_i(X_1, X_2, \dots, X_8) - A \geq 0; \quad (8)$$

$$0,05 \leq X_{<n>} \leq 0,5, \quad (9)$$

где D — допустимая область решения задачи НП;
 A — нормативное значение ВБР для каждого расчетного сечения ГМ.

Остановимся на формализации функциональных ограничений. В общем виде ВБР имеет вид [3]

$$R = \int_0^{\infty} f(\sigma) \left[\int_0^{\infty} f(r) dr \right] d\sigma = \int_0^{\infty} f(r) \left[\int_0^r f(\sigma) d\sigma \right] dr, \quad (10)$$

где $f(\sigma)$ — плотность распределения напряжений σ ;
 $f(r)$ — плотность распределения несущей способности r .

Анализ формулы (10) показывает, что для определения величины R достаточно знать плотность распределения $f(\sigma)$ напряжения σ и плотность распределения $f(r)$ несущей способности r . Под несущей способностью конструкции в данной задаче понимается одна из ее механических характеристик — предел текучести σ_T материала. Параметры и вид закона распределения величины σ_T для различных материалов можно найти в справочной литературе [1].

В реальных задачах проектирования вероятностные значения действующих напряжений определяют расчетным путем, используя ту или иную теорию прочности. В задачах ОП механических систем наибольшее распространение получила теория наибольших касательных напряжений. Значения эквивалентных напряжений σ_i для всех расчетных сечений стрелы ГМ ВП-80 находят в общем случае по известной формуле

$$\sigma_i = (\sigma_{X_i}^2 + 4\tau_{X_i}^2)^{1/2}, \quad (11)$$

где σ_{X_i}, τ_{X_i} — нормальные и касательные напряжения в i -том расчетном сечении ГМ, МПа.

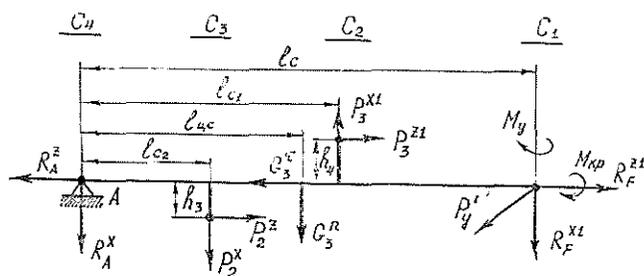


Рис. 2. Расчетная схема стрелы гидроманипулятора валоч-
но-трелевочной машины ВП-80.

Если воспользоваться расчетной схемой стрелы ГМ ВП-80 (рис. 2), то эквивалентные напряжения σ_1 для первого сечения можно найти по формулам:

$$\sigma_1 = \{A_1^2 + 4(B_1^2 + C_1^2)\}^{1/2}, \quad (12)$$

$$A_1 = -\frac{R_F^{z1}}{F_1} + \frac{M_y Y_1}{I_{1z}}; \quad (13)$$

$$B_1 = \frac{P_y' S_{1z}}{I_{1z} X_2} + \frac{R_F^{x1} S_{1y}}{I_{1y} X_1}; \quad (14)$$

$$C_1 = \frac{M_{kp}}{W_{1k}}, \quad (15)$$

где $R_{F_i}^{z_1}$, $R_{F_i}^{x_1}$, P'_y , M_y , $M_{кр}$ — усилия и моменты, действующие на ГМ;

F_i , W_{1k} , I_{1y} , I_{1z} — геометрические характеристики поперечных сечений ГМ; —

S_{1z} , S_{1y} — статические моменты площади поперечного сечения манипулятора относительно осей z и y , м².

Зная вероятностные характеристики нагрузок, действующих на стрелу ГМ, и других параметров, путем аппроксимации детерминированной формулы прочностного расчета (12) можно найти вероятностные характеристики напряжений, а именно математическое ожидание (МО) μ_σ и дисперсию напряжений D_σ . Для этого существует специально разработанный математический аппарат [2]. На практике широкое распространение получил метод статистической линеаризации (метод малых возмущений).

На основании обработки статистической информации о нагруженности ГМ ВП-80 было установлено, что усилия и моменты, действующие на стрелу ГМ, подчиняются нормальному закону распределения (НЗР). Используя метод статистической линеаризации, получим выражения для определения МО и дисперсии напряжений σ , действующих в расчетных сечениях стрелы ГМ ВП-80. Учитывая, что МО напряжений σ есть первый член разложения детерминированной зависимости (12) в ряд Тейлора, формулы (12) — (15) останутся прежними, но вместо входящих в них случайных величин необходимо записать их МО. Дисперсия напряжения D_{σ_i} в сечении i стрелы равна

$$D_{\sigma_i} \approx \frac{1}{4\mu_{\sigma_i}^2} \left\{ \left[-\frac{2A_i}{\mu_{F_i}} \right]^2 D_{R_{F_i}^{z_1}} + \left[\frac{8B_1\mu_{S_{1y}}}{\mu_{I_{1y}}X_1} \right]^2 D_{R_{F_i}^{x_1}} + \left[\frac{8B_1\mu_{S_{1z}}}{\mu_{I_{1z}}X_2} \right]^2 D_{P'_y} + \right. \\ \left. + \left[\frac{2A_i y_1}{\mu_{I_{1z}}} \right]^2 D_{M_y} + \left[\frac{8C_1}{\mu_{W_{1k}}} \right]^2 D_{M_{кр}} + \left[\frac{2A_i\mu_{R_{F_i}^{z_1}}}{\mu_{F_i}^2} \right]^2 D_{F_i} + \right. \\ \left. + \left[-\frac{8B_1\mu_{R_{F_i}^{x_1}}\mu_{S_{1y}}}{\mu_{I_{1y}}^2 X_1} \right]^2 D_{I_{1y}} + \left[-\frac{2A_i\mu_{M_y}Y_1}{\mu_{I_{1z}}^2} - \frac{8B_1\mu_{P'_y}\mu_{S_{1z}}}{\mu_{I_{1z}}^2 X_2} \right]^2 D_{I_{1z}} + \right. \\ \left. + \left[\frac{8B_1\mu_{R_{F_i}^{x_1}}}{\mu_{I_{1y}}X_1} \right]^2 D_{S_{1y}} + \left[\frac{8B_1\mu_{P'_y}}{\mu_{I_{1z}}X_2} \right]^2 D_{S_{1z}} + \left[-\frac{8C_1\mu_{M_{кр}}}{\mu_{W_{1k}}^2} \right]^2 D_{W_{1k}} \right\}. \quad (16)$$

В случае НЗР величин σ и r формула для определения ВБР имеет следующий вид [3]:

$$R = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\frac{\mu_r - \mu_\sigma}{\sqrt{D_r + D_\sigma}}}^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = \Phi \left(\frac{\mu_r - \mu_\sigma}{\sqrt{D_r + D_\sigma}} \right), \quad (17)$$

где μ_σ , μ_r — МО напряжений и несущей способности, МПа;

D_σ , D_r — дисперсии напряжений и несущей способности, МПа².

Для наглядности результатов оптимального решения целесообразно выполнить декомпозицию целевой функции и оптимизацию отдельно для каждого расчетного сечения. При этом в качестве уравнений ограничений принимается ВБР отдельно для каждого сечения стрелы ГМ ВП-80, а критерия оптимальности — площадь этого сечения.

Общее выражение площади F_i для C_i -го сечения имеет следующий вид:

$$F_i = 2\mu_t(X_i + X_{i+1} - 2\mu_t), \quad (18)$$

где μ_t — МО толщины материала, из которого изготовлен ГМ, м.

Принимая во внимание сказанное, задачу ОП ГМ можно записать следующим образом: найти

$$\min_{X^* \in D} F_i = \min f(X_i^*, X_{i+1}^*) \quad (19)$$

при ограничениях

$$R(X_i, X_{i+1}) - A \geq 0, \quad (20)$$

$$a_i \leq X_i \leq b_i; \quad (21)$$

$$a_{i+1} \leq X_{i+1} \leq b_{i+1},$$

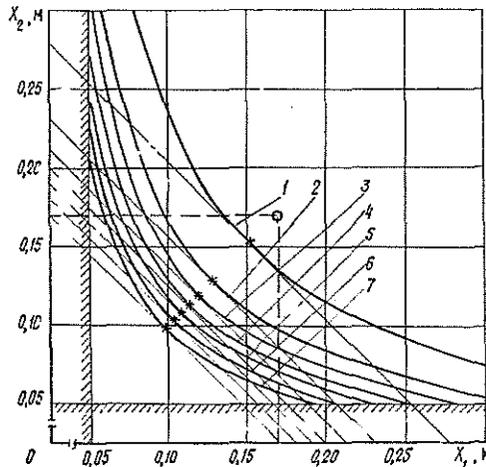
где a_i, a_{i+1} — нижнее ограничение на ширину и высоту i -того расчетного сечения стрелы ГМ ВП-80 соответственно, м;

b_i, b_{i+1} — верхнее ограничение на ширину и высоту i -того расчетного сечения стрелы ГМ ВП-80 соответственно, м.

Поиск оптимальных значений параметров ширины X_i^* и высоты X_{i+1}^* расчетных сечений выполняли методом дихотомии. Для этой цели был разработан специальный алгоритм, а его программа реализована на ЭВМ ЕС-1020.

Рис. 3. График для определения оптимальных геометрических параметров сечения S_1 стрелы при вероятности безотказной работы $R = 0,9999$ и различной прочности материала.

1 — 240 МПа; 2 — 350; 3 — 400; 4 — 450; 5 — 500; 6 — 550; 7 — 600 МПа.



На рис. 3 представлен график для определения оптимальных геометрических параметров сечения S_1 стрелы ГМ ВП-80 при ВБР, равной 0,9999, и различных значениях прочности материала μ_{r_i} . Коэффициент вариации прочности для каждого из рассматриваемых материалов равен 7,5 %.

Заштрихованными линиями показаны гипероктантные ограничения. Функциональное ограничение на величину ВБР представлено в виде семейства кривых, каждой из которых отвечает определенное значение прочности применяемого материала. Оптимальные значения ширины X_i^* и высоты X_{i+1}^* сечения S_1 стрелы ГМ ВП-80 находятся в точке касания кривых ограничений ВБР (при заданном значении прочности μ_{r_i}) и наклонных прямых, соответствующих минимальной площади поперечного сечения. Вид этих наклонных прямых определяется выражением (18).

Точка пересечения горизонтальных и вертикальных штриховых линий, обведенная кружочком на рис. 3, характеризует параметры реального сечения S_1 стрелы ГМ ВП-80 (ширина сечения $X_1 = 0,17$ м, высота сечения $X_2 = 0,17$ м).

Корректность процедуры декомпозиции целевой функции следует из выражения (1), в котором величины l_i и γ для данного ГМ постоянны, а это значит, что для минимизации массы следует последовательно минимизировать поперечную площадь всех расчетных сечений ГМ. Стрела ГМ ВП-80 имеет полое прямоугольное поперечное сечение из двух сваренных между собой корытообразных профилей (рис. 1).

Остановимся на анализе результатов оптимального решения сечения S_1 стрелы, а затем ГМ ВП-80 в целом. Как видно из графика (рис. 3), наибольшую площадь имеет сечение ГМ из материала, прочность которого 240 МПа. При повышении предела текучести стали от 350 до 600 МПа с интервалом 50 МПа экономия площади для сечения S_1 составит соответственно 7,3; 12,6; 17,1; 19,9; 24,3 %.

Было установлено, что при повышении предела текучести стали от 350 до 400 МПа масса стрелы ГМ ВП-80 может быть уменьшена на 6 %. При увеличении этой характеристики последовательно через 50 МПа до 600 МПа экономия массы составит 10 и далее 13, 16, 18 % соответственно. Для рукоятки ГМ ВП-80 эти цифры равны 6, 10, 12, 14 и 16 %. Полученные данные хорошо согласуются с результатами, известными в других отраслях промышленности, а также характеристиками зарубежных лесных машин. Характерно, что последовательное повышение прочности не означает пропорционального снижения массы ГМ. Так, при увеличении предела текучести от 350 до 450 МПа снижение массы составило 7,4 %. Далее при последовательном увеличении этой характеристики на 50 МПа экономия массы составит соответственно 6,0; 4,9; 4,6 и 4,1 %, что не пропорционально увеличению стоимости высококачественных сталей. Поэтому с учетом экономических соображений увеличение механических характеристик используемых материалов имеет разумный предел. Так, для сталей с пределом текучести 250 МПа и выше увеличение этой характеристики на 50 МПа влечет за собой повышение их стоимости в среднем на 8 % за счет дорогостоящих легирующих добавок.

Предлагаемая математическая модель оптимального проектирования навесных гидроманипуляторов лесных машин позволяет выполнять количественный анализ конструктивных решений для расчетных сечений любой формы. Для этого нужно только подставить аналитическое выражение соответствующей геометрической характеристики сечения (момент инерции сечения, момент сопротивления и др.) в математическую модель оптимального проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Вероятностные характеристики прочности авиационных материалов и размеров сортамента: Справочник/ Под ред. С. О. Охупкина.— М.: Машиностроение, 1970.— 526 с. [2]. Гладкий В. Ф. Вероятностные методы проектирования конструкций летательного аппарата.— М.: Наука, 1982.— 270 с. [3]. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем/ Пер. с англ.— М.: Мир, 1980.— 604 с. [4]. Кушляев В. Ф. Лесозаготовительные машины манипуляторного типа.— М.: Лесн. пром-сть, 1981.— 248 с.

Поступила 13 августа 1986 г.