

## МНОГОУРОВНЕВЫЙ АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОГО РАСКРОЯ ЗАГОТОВОК СИЛОВЫХ ПАНЕЛЕЙ ПЛАНЕРА САМОЛЕТА В СЕРИЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

В нашей работе [1] проведен анализ эффективности технологии лазерной резки заготовок деталей из цветных металлов в серийном авиационном производстве, который показал необходимость проведения исследований по установлению оптимальных режимов этого технологического процесса, обеспечивающих высокую долговечность (ресурс) силовых панелей планера самолета.

В связи с этим в работе [2] нами предложен экспериментально-теоретический метод оптимизации параметров процесса лазерной резки образцов материалов из алюминиевых сплавов по критерию максимальной долговечности.

Для реализации предлагаемого метода оптимизации режимов лазерной резки ниже использован многоуровневый алгоритм. Алгоритм формируется из трех циклов каждого уровня. Число уровней соответствует трем относительным факторам последствия лазерной резки: средней высоте микронеровностей  $\bar{h}_e$ , осредненной микротвердости зоны термического влияния (ЗТВ)  $\bar{H}_{\mu(20)ЗТВ}$  и протяженности этой зоны  $\bar{t}_{ЗТВ}$ . Каждый из этих факторов определяется экспериментально для трех партий образцов материала, вырезанных на различных режимах работы лазера, определяемых тремя относительными факторами причины снижения долговечности: скоростью резания  $V_L$ , давлением вспомогательного газа  $p_L$  и мощностью лазерного излучения  $N_L$ . Абсолютные значения этих факторов соответствуют максимальному, среднему и нижнему значениям располагаемых диапазонов лазерной установки  $\{Y_{i \max}, Y_{i \text{mid}}, Y_{i \min}\}$ ,  $i = V, p, N$ .

В алгоритме последовательно реализуются все три цикла каждого уровня. Исходная реализуемая матрица факторов причины содержит варьируемый столбец одного параметра, например скорости реза  $\bar{V}$ , и два столбца остальных параметров  $\bar{p}$  и  $\bar{N}$ , не варьируемых на первом уровне (например  $\bar{p}_{\max}$ ,  $\bar{N}_{\max}$ ).

В результате анализа значений одного из факторов следствия (например  $\bar{h}_e$ ) выбирается его минимальное значение при данном сочетании параметров причины, например

$$\begin{array}{ccc} \bar{V}_{л\ max} & \bar{\rho}_{max} & \bar{N}_{max} \\ \bar{V}_{л\ mid} & \bar{\rho}_{max} & \bar{N}_{max} \\ \bar{V}_{л\ min} & \bar{\rho}_{max} & \bar{N}_{max}, \end{array}$$

при которых  $\bar{h}'_{e\ min}$  соответствует верхняя строка, содержащая  $\bar{V}_{л\ max}$ .

На втором цикле I этапа проводится лазерная резка при постоянных значениях  $\bar{V}_{л\ max}$  и  $\bar{N}_{max}$  и варьируемых  $\bar{\rho}$ :

$$\begin{array}{ccc} \bar{V}_{л\ max} & \bar{\rho}_{mid} & \bar{N}_{max} \\ \bar{V}_{л\ max} & \bar{\rho}_{min} & \bar{N}_{max}, \end{array}$$

и снова выбирается минимальное значение фактора  $\bar{h}'_{e\ min}$  (здесь штрих означает минимальное значение второго этапа).

Эта партия образцов материала, имеющая  $\bar{h}'_{e\ min}$ , подвергается испытанию на долговечность, определяется  $\sigma_{\partial}(\bar{h}'_{e\ min})$ , которое заносится в банк данных «долговечность». Ниже подробно описаны все процедуры, выполняемые на всех трех циклах.

### Цикл I I уровня

1. Проводится лазерная резка трех партий образцов на скоростях реза  $\bar{V}_{л\ max}$ ,  $\bar{V}_{л\ mid}$ ,  $\bar{V}_{л\ min}$  при  $\bar{\rho}_{max}$  и  $\bar{N}_{max}$ .

2. Для каждой из этих трех партий образцов, вырезанных при разных скоростях резки, проводится замер микронеровностей  $h_e$ .

3. Выбирается партия, в которой имеет место минимальный размер микронеровностей  $h_{e\ min}$ , полученный при скорости реза, например,  $V_{л\ max}$ .

4. Для этой партии проводится замер остальных факторов последствия  $\bar{H}_{\mu(20)}(\bar{h}_{e\ min})$  и  $\bar{t}_{ЗТВ}(\bar{h}_{e\ min})$ .

5. Партия образцов, имеющих  $h_{e\ min}$ , полученных при скорости реза  $V_{л\ max}$ , подвергается испытаниям на долговечность. Полученная относительная долговечность  $\bar{\sigma}_{\partial}(\bar{h}_{e\ min})$  фиксируется (заносится в банк данных «долговечность»).

6. Одновременно составляется регрессионное уравнение [2]

$$\bar{\sigma}_0 = \sum_{i=1}^3 \alpha_i X_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \alpha_{ij} X_i X_j, \quad (1)$$

в которое подставляются значения  $X_i$ , где  $X_1 = \bar{V}_{л\ max}$ ;  $X_2 = \bar{p}(\bar{V}_{max}) = \bar{p}_{max}$ ;  $X_3 = \bar{N}(\bar{V}_{max}) = \bar{N}_{max}$ .

7. Уравнение (1) с параметрами  $X_1, X_2, X_3$  заносится в банк «регрессии (1)».

8. Составляется регрессионное уравнение фактора последствий, в данном случае

$$\bar{V}_{max}(h'_2\ min) = \sum_{i=1}^3 \beta_i y_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \beta_{ij} y_i y_j, \quad (2)$$

где  $y_i$  соответственно равны  $y_1 = \bar{h}_e\ min$ ;  $y_2 = \bar{H}_{\mu(20)}(\bar{h}_e\ min)$ ;  $y_3 = \bar{t}_{ЗТВ}(\bar{h}_e\ min)$ .

9. Уравнение (2) с параметрами (факторами)  $\bar{h}_e\ min, \bar{H}_{\mu(20)ЗТВ}(\bar{h}_e\ min), \bar{t}_{ЗТВ}(\bar{h}_e\ min)$  заносится в банк данных (память) «регрессии (2)».

### Цикл II I уровня

1. Проводится лазерная резка двух партий образцов при разных давлениях газа  $\bar{p}_{max}, \bar{p}_{mid}, \bar{p}_{min}$  на скорости предыдущего цикла, например,  $\bar{V}_{л\ max}$  при  $\bar{N}_{max}$  (так как сочетание  $\{\bar{V}_{л\ max}, \bar{p}_{max}, \bar{N}_{max}\}$  уже было испытано на I цикле).

2. Для каждой из этих двух партий образцов проводится замер микронеровностей  $h'_2$ .

3. Выбирается партия, в которой имеет место  $h'_2\ min$ .

4. Для партии образцов с  $h'_2\ min$ , полученной при  $\bar{V}_{л\ max}$  и соответствующем давлении, например  $\bar{p}_{min}$  и мощности  $\bar{N}_{max}$ , проводится замер остальных факторов последствия  $\bar{H}_{\mu(20)}(h'_2\ min)$  и  $\bar{t}_{ЗТВ}(h'_2\ min)$ .

5. Партия образцов, имеющих  $h'_2\ min$ , полученных при скорости реза  $V_{л\ max}$ , подвергается испытаниям на долговечность. Полученная относительная долговечность  $\bar{\sigma}_0(h'_2\ min)$  заносится в банк данных «долговечность».

6. Одновременно составляется регрессионное уравнение (1), в которое подставляются значения  $X_i$ , где  $X_1 = \bar{V}_{л\ max}$ ;  $X_2 = \bar{p}(\bar{h}'_{e\ min}) = \bar{p}_{min}$ ;  $X_3 = \bar{N}(\bar{h}'_{e\ min})$ .

7. Уравнение п. 6 заносится в банк «регрессии (1)».

8. Составляется регрессионное уравнение (2) с параметрами  $y_1 = \bar{h}'_{e\ min}$ ;  $y_2 = \bar{H}_{\mu(20)}(\bar{h}'_{e\ min})$ ;  $y_3 = \bar{t}_{ЗТВ}(\bar{h}'_{e\ min})$ .

9. Уравнение п. 8 заносится в банк данных «регрессии (2)».

### Цикл III I уровня

1. Проводится лазерная резка двух партий образцов при мощностях лазера  $\bar{N}_{max}$ ,  $\bar{N}_{mid}$ ,  $\bar{N}_{min}$  на скоростях предыдущих циклов  $\bar{V}_{л\ max}$  и при давлении газа  $\bar{p}_{min}$  (так как сочетание  $\{\bar{V}_{л\ max}, \bar{p}_{min}, \bar{N}_{max}\}$  уже было испытано на II цикле).

2. Для каждой из этих двух партий образцов проводится замер микронеровностей  $h''_e$ .

3. Выбирается партия, в которой имеет место  $h''_{e\ min}$  (из сочетаний второго цикла  $\{\bar{V}_{л\ max}, \bar{p}_{min}, \bar{N}_{mid}\}$  и  $\{\bar{V}_{л\ max}, \bar{p}_{min}, \bar{N}_{min}\}$ ).

4. Для партии образцов с  $h''_{e\ min}$ , полученной при сочетаниях факторов  $\{\bar{V}_{л\ max}, \bar{p}_{min}, \bar{N}_{mid}\}$  и  $\{\bar{V}_{л\ max}, \bar{p}_{min}, \bar{N}_{min}\}$  проводится замер остальных факторов последствия  $\bar{H}_{\mu(20)}(h''_{e\ min})$  и  $\bar{t}_{ЗТВ}(h''_{e\ min})$  (для сочетания  $\{\bar{V}_{л\ max}, \bar{p}_{min}, \bar{N}_{max}\}$  замеры этих факторов были выполнены на II цикле).

5. Партия образцов, имеющих  $h''_{e\ min}$ , подвергается испытаниям на долговечность. Полученная относительная долговечность  $\bar{\sigma}_d(h''_{e\ min})$  заносится в банк данных «долговечность».

6. Одновременно составляется регрессионное уравнение (1), в которое подставляются значения  $X_i$ , где  $X_1 = \bar{V}_{л\ max}$ ;  $X_2 = \bar{p}_{min}$ ;  $X_3 = \bar{N}(h''_{e\ min})$  ( $X_3$  может иметь относительную мощность лазера либо  $\bar{N}_{mid}$ , либо  $\bar{N}_{min}$ ).

7. Уравнение п. 6 заносится в банк «регрессии (1)».

8. Составляется регрессионное уравнение (2) с параметрами  $y_1 = h''_{e\ min}$ ;  $y_2 = \bar{H}_{\mu(20)}(h''_{e\ min})$ ;  $y_3 = \bar{t}_{ЗТВ}(h''_{e\ min})$ .

9. Уравнение п. 8 заносится в банк данных «регрессии (2)».

После выполнения трех циклов I уровня осуществляется три цикла испытаний образцов материала II уровня.

Алгоритм каждого цикла идентичен изложенным выше за исключением фактора последействия лазерной резки, за который принимается минимальное значение микротвердости в ЗТВ.

### Цикл I II уровня

1. При этом из трех партий образцов, задействованных на I цикле I уровня, вырезанных при  $\bar{V}_{л\ max}$ ,  $\bar{V}_{л\ mid}$ ,  $\bar{V}_{л\ min}$ , давлениях  $\bar{p}_{max}$ ,  $\bar{p}_{max}$  и  $\bar{p}_{max}$  и мощностях лазера  $\bar{N}_{max}$ ,  $\bar{N}_{max}$  и  $\bar{N}_{max}$ , выбирается партия, в которой замеренная микротвердость в ЗТВ минимальна  $\bar{H}_{\mu(20)\ ЗТВ\ min}^*$ , например  $\{\bar{V}_{л\ min}, \bar{p}_{max}, \bar{N}_{max}\}$ .

2. Эта партия образцов подвергается испытаниям на долговечность. Полученная относительная долговечность  $\bar{\sigma}_d(\bar{H}_{\mu(20)\ ЗТВ\ min})$  заносится в банк данных «долговечность».

3. Составляется регрессионное уравнение (1), в которое подставляются значения  $X_j$  те же, что и в п. 6 I цикла I уровня ( $X_1 = \bar{V}_{л\ max}$ ;  $X_2 = \bar{p}(\bar{V}_{max}) = \bar{p}_{max}$ ;  $X_3 = \bar{N}(\bar{V}_{max}) = \bar{N}_{max}$ ), однако в левой его части будет стоять  $\bar{\sigma}_d(\bar{H}_{\mu(20)\ ЗТВ\ min})$ , что приведет к отличным коэффициентам регрессии  $\alpha_j$  и  $\alpha_{ij}$ .

4. Уравнение п. 3 заносится в банк «регрессии (1)».

5. Составляется регрессионное уравнение (2) с факторами  $Y_1 = \bar{h}(\bar{H}_{\mu(20)\ ЗТВ\ min})$ ;  $Y_2 = \bar{H}_{\mu(20)\ ЗТВ\ min}$ ;  $Y_3 = \bar{t}_{ЗТВ}(\bar{H}_{\mu(20)\ ЗТВ\ min})$ .

6. Уравнение п. 5 заносится в банк «регрессии (2)».

### Цикл II II уровня

1. Из двух партий, вырезанных лазерной резкой при факторах I уровня, проводится замер  $\bar{H}'_{\mu(20)\ ЗТВ}$  и выбирается та, в которой  $\bar{H}'_{\mu(20)\ ЗТВ\ min}$  получена при соответствующем давлении (например  $\bar{p}_{mid}$  и  $\bar{N}_{max}$ ).\*\*)

\*) Теоретически это может оказаться та же партия, в которой микронеровности были минимальны  $\bar{h}_{min}$  в I цикле I уровня. В этом случае I цикл II уровня совпадает с I циклом I этапа по всем пунктам.

\*\*) Сочетание факторов  $\{\bar{V}_{л\ mid}, \bar{p}_{max}, \bar{N}_{max}\}$  уже задействовано на I цикле II уровня, дало  $\bar{H}_{\mu(20)\ ЗТВ\ min}$  и предопределило  $\bar{\sigma}_d(\bar{H}_{\mu(20)\ ЗТВ\ min})$  в банке данных «долговечность».

2. Партия п. 1 подвергается испытаниям на долговечность. Полученная относительная долговечность  $\bar{\sigma}_d(\bar{H}'_{\mu(20)} \text{ЗТВ } min)$  заносится в банк данных «долговечность».

3. Составляется регрессионное уравнение (1), в которое подставляются значения  $X_j$  те же, что и в п. 6 I цикла I уровня ( $X_1 = \bar{V}_{л \text{ mid}}$ ;  $X_2 = \bar{p}(\bar{H}'_{\mu(20)} \text{ЗТВ } min) = \bar{p}_{mid}$ ;  $X_3 = \bar{N}(\bar{H}'_{\mu(20)} \text{ЗТВ } min) = \bar{N}_{max}$ ).

4. Уравнение п. 3 заносится в банк «регрессии (1)».

5. Составляется регрессионное уравнение (2) с факторами  $y_1 = \bar{h}(\bar{H}'_{\mu(20)} \text{ЗТВ } min)$ ;  $y_2 = \bar{H}'_{\mu(20)} \text{ЗТВ } min$ ;  $y_3 = \bar{t}_{ЗТВ}(\bar{H}'_{\mu(20)} \text{ЗТВ } min)$ .

6. Уравнение п. 5 заносится в банк «регрессии (2)».

### Цикл III II уровня

1. Проводится лазерная резка двух партий образцов при мощностях лазера  $\bar{N}_{mid}$  и  $\bar{N}_{min}$  на скорости  $\bar{V}_{л \text{ mid}}$  при давлении  $\bar{p}_{mid}$  (так как сочетание факторов  $\{\bar{V}_{л \text{ mid}}, \bar{p}_{mid}, \bar{N}_{max}\}$  уже было использовано на II цикле).

2. Для двух партий образцов п. 1 проводится замер микротвердости в ЗТВ.

3. Выбирается партия, в которой  $H''_{\mu(20)} \text{ЗТВ}$  минимальна.

4. Для партии образцов п. 3 проводится замер факторов последствия  $\bar{h}_2(\bar{H}''_{\mu(20)} \text{ЗТВ } min)$  и  $\bar{t}_{ЗТВ}(\bar{H}''_{\mu(20)} \text{ЗТВ } min)$ .

5. Партия п. 3 подвергается испытаниям на долговечность и  $\bar{\sigma}_d(\bar{H}''_{\mu(20)} \text{ЗТВ } min)$  заносится в банк данных «долговечность».

6. Составляется регрессионное уравнение (1), в которое подставляются значения  $X_j$ :  $X_1 = \bar{V}_{л \text{ mid}}$ ;  $X_2 = \bar{p}_{mid}$ ;  $X_3 = \bar{N}(\bar{H}''_{\mu(20)} \text{ЗТВ } min)$  ( $X_3$  может иметь относительную мощность лазера  $\bar{N}_{mid}$  либо  $\bar{N}_{min}$ ).

7. Уравнение п. 6 заносится в банк «регрессии (1)».

8. Составляется регрессионное уравнение (2) с параметрами  $y_1 = \bar{h}(\bar{H}''_{\mu(20)} \text{ЗТВ } min)$ ;  $y_2 = \bar{H}''_{\mu(20)} \text{ЗТВ } min$ ;  $y_3 = \bar{t}_{ЗТВ}(\bar{H}''_{\mu(20)} \text{ЗТВ } min)$ .

9. Уравнение п. 8 заносится в банк «регрессии (2)».

После выполнения трех циклов II уровня проводится три цикла испытаний образцов материала III уровня. В качестве минимального фактора последствия лазерной резки принимается  $\bar{t}_{ЗТВ \text{ min}}$ .

### Цикл I III уровня

1. Из трех партий образцов, задействованных на I цикле I уровня, выбирается партия, в которой замеренная длина ЗТВ минимальна –  $\bar{t}_{ЗТВ\ min}$ , например, при сочетании факторов  $\{\bar{V}_{л\ min}, \bar{p}_{max}, \bar{N}_{max}\}$ .

2. Партия п. 1 подвергается испытаниям на долговечность. Полученная относительная долговечность  $\bar{\sigma}_d(\bar{t}_{ЗТВ\ min})$  заносится в банк данных «долговечность».

3. Составляется регрессионное уравнение (1), в которое подставляются значения  $X_i$ :  $X_1 = \bar{V}_{л\ min}$ ;  $X_2 = \bar{p}_{max}$ ;  $X_3 = \bar{N}_{max}$ .

4. Уравнение п. 3 заносится в банк данных «регрессии (1)».

5. Составляется регрессионное уравнение (2) с факторами  $y_1 = \bar{h}(\bar{t}_{ЗТВ\ min})$ ;  $y_2 = \bar{H}_{\mu(20)ЗТВ}(\bar{t}_{ЗТВ\ min})$ ;  $y_3 = \bar{t}_{ЗТВ\ min}$ .

6. Уравнение п. 5 заносится в банк данных «регрессии (2)».

### Цикл II III уровня

1. Из двух партий, вырезанных лазерной резкой I уровня<sup>\*)</sup>, проводится замер  $\bar{t}'_{ЗТВ}$  и выбирается та, в которой  $\bar{t}'_{ЗТВ\ min}$ , полученная при соответствующем давлении газа, например  $\bar{p}_{mid}, \bar{N}_{mid}$ .

2. Партия образцов п. 1 подвергается испытаниям на долговечность. Полученная относительная долговечность  $\bar{\sigma}_d(\bar{t}'_{ЗТВ\ min})$  заносится в банк данных «долговечность».

3. Составляется регрессионное уравнение (1), в которое подставляются значения  $X_i$ :  $X_1 = \bar{V}_{л\ min}$ ;  $X_2 = \bar{p}(\bar{t}'_{ЗТВ\ min}) = \bar{p}_{mid}$ ;  $X_3 = \bar{N}(\bar{t}'_{ЗТВ\ min}) = \bar{N}_{mid}$ .

4. Уравнение п. 3 заносится в банк данных «регрессии (1)».

5. Составляется регрессионное уравнение (2) с факторами  $y_1 = \bar{h}(\bar{t}'_{ЗТВ\ min})$ ;  $y_2 = \bar{H}_{\mu(20)ЗТВ}(\bar{t}'_{ЗТВ\ min})$ ;  $y_3 = \bar{t}'_{ЗТВ\ min}$ .

6. Уравнение п. 5 заносится в банк данных «регрессии (2)».

### Цикл III III уровня

1. Проводится лазерная резка двух партий образцов при мощностях лазера  $\bar{N}_{max}$  и  $\bar{N}_{min}$  на скорости  $\bar{V}_{л\ min}$  при давлении  $\bar{p}_{mid}$  (так

---

<sup>\*)</sup> Сочетание факторов  $\{\bar{V}_{л\ min}, \bar{p}_{max}, \bar{N}_{max}\}$  уже задействовано на I цикле III уровня, дало  $\bar{t}_{ЗТВ\ min}$  и предопределило  $\bar{\sigma}_d(\bar{t}_{ЗТВ\ min})$  в банке данных «долговечность».

как сочетание факторов  $\{\bar{V}_{л\ min}, \bar{\rho}_{mid}, \bar{N}_{mid}\}$  уже было задействовано на II цикле).

2. Для двух партий образцов п. 1 проводится замер протяженности ЗТВ  $\bar{t}_{ЗТВ}''$ .

3. Выбирается партия образцов, в которой  $\bar{t}_{ЗТВ\ min}''$ .

4. Для партии п. 3 проводится замер  $\bar{h}_e(\bar{t}_{ЗТВ\ min}'')$  и  $\bar{H}_{\mu(20)ЗТВ\ min}(\bar{t}_{ЗТВ\ min}'')$ .

5. Партия образцов п. 3 подвергается испытаниям на долговечность и  $\bar{\sigma}_d(\bar{t}_{ЗТВ\ min}'')$  заносится в банк данных «долговечность».

6. Составляется регрессионное уравнение (1), в которое подставляются значения  $X_i$ :  $X_1 = \bar{V}_{л\ min}$ ;  $X_2 = \bar{\rho}_{mid}$ ;  $X_3 = \bar{N}(\bar{t}_{ЗТВ\ min}'')$  ( $X_3$  может иметь относительную мощность лазера  $\bar{N}_{max}$  либо  $\bar{N}_{min}$ ).

7. Уравнение п. 6 заносится в банк «регрессии (1)».

8. Составляется регрессионное уравнение (2) с параметрами  $y_1 = \bar{h}_e(\bar{t}_{ЗТВ\ min}'')$ ;  $y_2 = \bar{H}_{\mu(20)ЗТВ}(\bar{t}_{ЗТВ\ min}'')$ ;  $y_3 = \bar{t}_{ЗТВ\ min}''$ .

9. Уравнение п. 8 заносится в банк «регрессии (2)».

На этом реализация трехуровневого алгоритма заканчивается. При этом в банке данных «долговечность» находится 9 значений относительной долговечности партий образцов материала, соответствующих трем минимальным относительным факторам последействия лазерной резки  $\bar{h}_e\ min$ ,  $\bar{H}_{\mu(20)ЗТВ\ min}$ ,  $\bar{t}_{ЗТВ\ min}$ , определенных при трех сочетаниях факторов причины снижения долговечности образцов материала  $V_{л}$ ,  $\rho_e$ ,  $N_{л}$ . Из этих девяти значений выбирается максимальное значение  $\{\bar{\sigma}_d\}_{max}$ .

В банках данных «регрессии (1)» и «регрессии (2)» находится также 9 уравнений, в каждое из которых входит 6 неизвестных коэффициентов  $\alpha_i$  и  $\alpha_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) и  $\beta_i$  и  $\beta_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ).

Таким образом, система уравнений для определения этих коэффициентов является избыточной. Использовать этот резерв можно двумя способами.

Первый – использование избыточности уравнений для статистической обработки (правки) значений этих коэффициентов с целью анализа их вероятностных характеристик.

Второй способ может быть ориентирован на повышение точности регрессионных математических моделей (1) и (2) путем введения в них

квадратичных членов факторов последствия и причины снижения долговечности образцов материалов после лазерной резки:

$$\bar{\sigma}_d(y_i \min)_{max} = \left( \sum_{i=1}^3 \alpha_i X_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=l+1}^3 \alpha_{ij} X_i X_j \right) + \sum_{i=1}^3 \alpha_{ii} X_i^2; \quad (3)$$

$$\bar{X}_i(y_i (\bar{\sigma}_d \max))_{max} = \left( \sum_{i=1}^3 \beta_i y_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=l+1}^3 \beta_{ij} y_i y_j \right) + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} y_i^2. \quad (4)$$

Добавление квадратичных членов в модели (1) и (2) не потребует увеличения ни количества замеров факторов последствия снижения долговечности образцов материалов после лазерной резки, ни числа испытаний образцов на долговечность, что особенно важно, так как именно эти испытания повышают трудоемкость, а также материальные и временные затраты на реализацию предложенного многоуровневого алгоритма оптимизации режимов лазерной резки по критерию максимальной долговечности образцов материалов.

Следует отметить еще одну важную особенность предложенного метода оптимизации технологического процесса лазерной резки и реализующего его алгоритма.

Сама по себе реализация алгоритма обеспечивает синтез фактически не оптимальных факторов причины снижения долговечности, а только относительно близких к ним, т.е. квазиоптимальных (рациональных), так как процесс выбора этих факторов дискретный (сочетание факторов  $\{\bar{V}, \bar{\rho}, \bar{N}\}$  ограничено тремя строчками в матрице

$$\begin{vmatrix} \bar{V}_{max} & \bar{\rho}_{max} & \bar{N}_{max} \\ \bar{V}_{mid} & \bar{\rho}_{mid} & \bar{N}_{mid} \\ \bar{V}_{min} & \bar{\rho}_{min} & \bar{N}_{min} \end{vmatrix}$$

и последующих матрицах сочетаний этих факторов).

Попутно отметим, что выбор трех значений факторов в столбце преследовал цель только снижения до минимума числа активных (используемых) измерений факторов последствия  $\bar{h}_e$ ,  $\bar{H}_{\mu(20)}$  ЗТВ и  $\bar{t}_{ЗТВ}$ , трудоемкость которых существенно ниже по временным и материальным затратам, нежели испытания образцов материалов на долговечность.

Поэтому количество строк в матрице можно оправданно увеличить, накрывая располагаемые диапазоны параметров интервалами

$X_{mid}^{max} = \frac{X_{max} + X_{mid}}{2}$  и  $X_{mid}^{min} = \frac{X_{mid} + X_{min}}{2}$ . Таким образом число

строк в матрице увеличится до пяти:  $X_{max}, X_{mid}^{max}, X_{mid}, X_{mid}^{min}, X_{min}$ ,

что, несомненно, снизит вероятность «проскочить» оптимальный уровень (вариант) сочетаний факторов причины снижения долговечности образцов материалов.

Приблизиться от квазиоптимальных к оптимальным значениям факторов<sup>\*)</sup> можно путем нахождения и последующего решения системы уравнений, полученных путем дифференцирования  $\bar{\sigma}_{\partial max i} (i = 1, 2, 3)$  каждого цикла каждого уровня по изменяемым факторам, например

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\sigma}_{\partial max}^{11}}{\partial X_1^{11}} &= \alpha_1 + \alpha_{12} X_2^{11} + \alpha_{13} X_3^{11} = 0; \\ \frac{\partial \bar{\sigma}_{\partial max}^{11}}{\partial X_2^{11}} &= \alpha_2 + \alpha_{12} X_1^{11} + \alpha_{23} X_3^{11} = 0; \\ \frac{\partial \bar{\sigma}_{\partial max}^{11}}{\partial X_3^{11}} &= \alpha_3 + \alpha_{13} X_1^{11} + \alpha_{23} X_2^{11} = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где верхний индекс «11» означает первый цикл первого уровня.

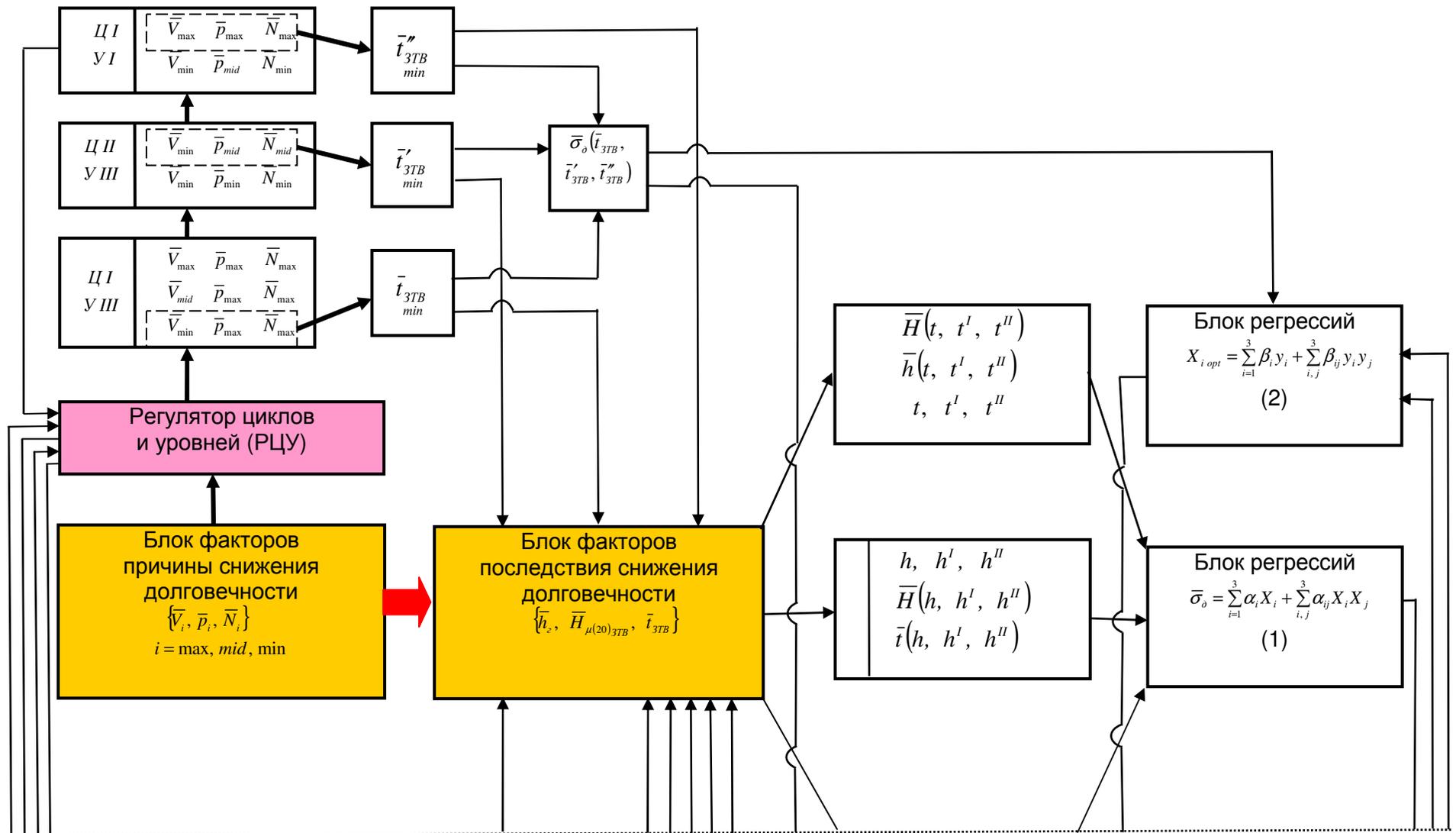
В общем случае таких систем уравнений необходимо решить девять (по числу уравнений в базе данных «долговечность») с последующей подстановкой  $X_i^{ij} (i, j = 1, 2, 3)$  в уравнение (1), нахождением

$\bar{\sigma}_{\partial max}^{ij}$  в каждом цикле на каждом уровне и выбором из этих значений  $\bar{\sigma}_{\partial max}^{ij}$ .

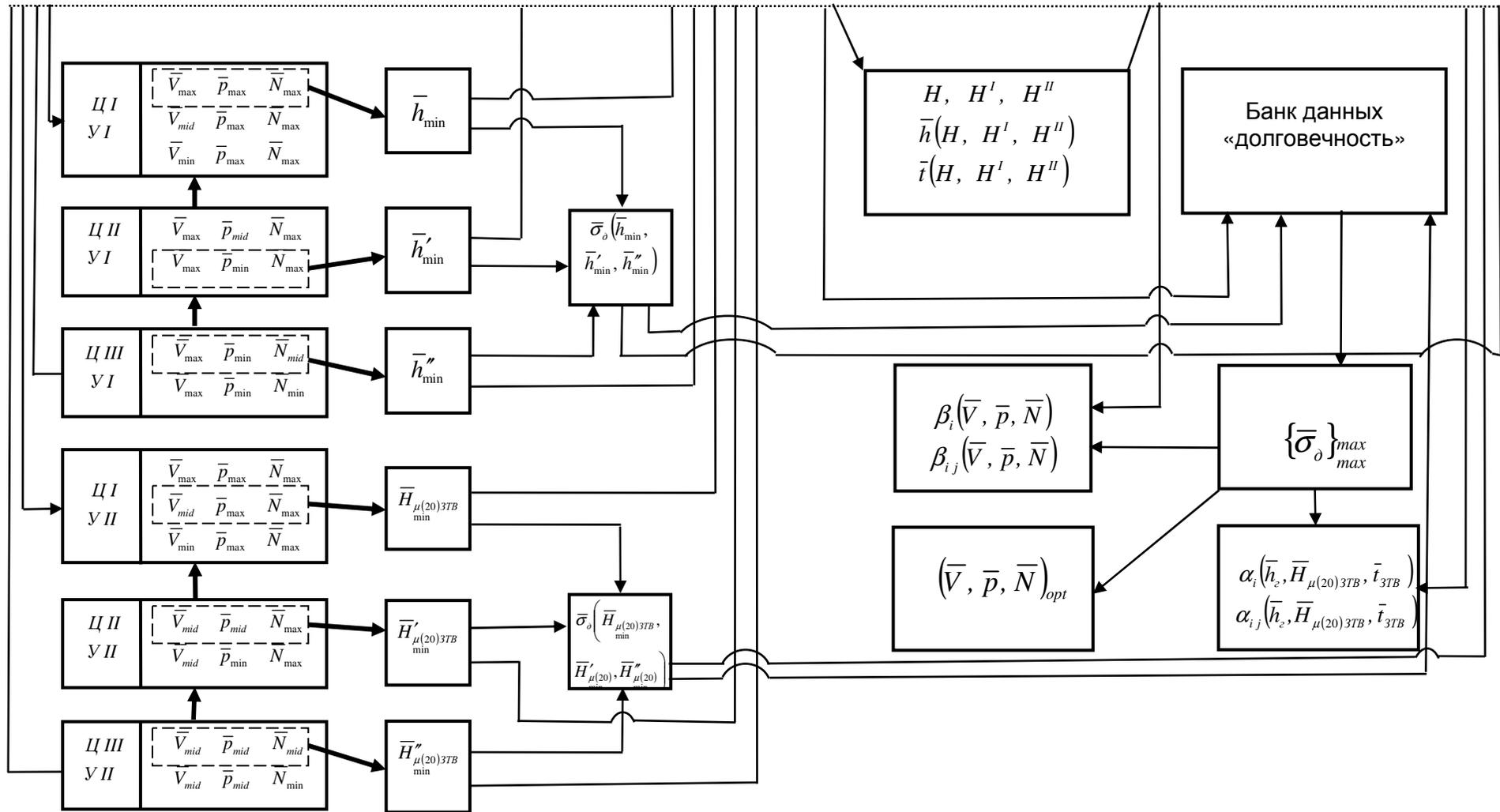
На рисунке представлена укрупненная блок-схема реализации алгоритма поиска квазиоптимальных факторов причины и последствия снижения долговечности образцов материалов после лазерной резки.

Отметим еще один важный вариант реализации предложенного метода. Строго говоря, алгоритм обеспечивает получение квазиоптимальных значений факторов причины снижения долговечности только для одного варианта материала (алюминиевого сплава определенной марки)

<sup>\*)</sup> Принимая гипотезу о сохранении значений (неизменности) коэффициентов регрессионного уравнения при переходе к новым интервалам.



Укрупненная блок-схема реализации многоуровневого алгоритма оптимизации по критерию максимальной долговечности факторов лазерной резки образцов листовых материалов



Укрупненная блок-схема реализации многоуровневого алгоритма оптимизации по критерию максимальной долговечности факторов лазерной резки образцов листовых материалов (окончание)

Однако, рассмотрев несколько однотипных сплавов, можно оценить разброс для этой группы значений факторов  $X_i$ , выполнить их вероятностную оценку и рекомендовать с определенными оговорками осредненные значения квазиоптимальных факторов для всей группы рассматриваемых сплавов или даже для любых алюминиевых сплавов (последнее, вероятно, возможно только с едва ли допустимым уровнем рассеивания коэффициентов регрессий (1) и (2)).

### Выводы

1. Предложен эффективный многоуровневый алгоритм оптимизации режимов лазерной резки и синтеза близких к оптимальным факторов причин и последствий исследуемого процесса.

2. Реализация этого алгоритма позволяет получать результаты различной степени точности в зависимости от располагаемых ресурсов времени и средств путем расширения активно используемых измерений факторов последствий процесса и других средств и способов модификации предложенного алгоритма.

### Список использованных источников

1. Гайдачук В.Е. Анализ эффективности технологии лазерной обработки листовых деталей из алюминиевых сплавов в авиационном производстве / В.Е. Гайдачук, А.И. Костенко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2010. – Вып. 2(62). – С. 20 – 37.

2. Гайдачук В.Е. Экспериментально-теоретический метод оптимизации параметров процесса лазерной резки образцов материалов из алюминиевых сплавов по критерию максимальной долговечности / В.Е. Гайдачук, А.И. Костенко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2010. – Вып. 48.

3. Демиденко Е.З. Линейная и нелинейная регрессии / Е.З. Демиденко. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 302 с.

*Поступила в редакцию 19.10.2010.  
Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Н. Кобрин,  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков*