

Das Problem der Sicherheitsfaktoren von ausgewählten Elementen einer Förderanlage im Bergbau

Siemieniec, A.; Wolny, S.

1 Einleitung

Bereits vor einigen Jahrzehnten hat man festgestellt, dass es nötig ist, die Methoden für Festigkeitsberechnungen der Elemente einer Förderanlage zu novellieren, was durch eine Reihe theoretischer und experimenteller Forschungsarbeiten u.a. /4/ und /5/ im Bereich der Identifizierung ihrer Belastungen begleitet wurde. Man wies einen wesentlichen Unterschied zwischen den tatsächlichen Belastungswerten und den Belastungswerten nach, die aufgrund der gültigen Richtlinien (aktuell /6/) angenommen wurden, insbesondere beim Anwachsen der Tragfähigkeit, Fördergeschwindigkeit und -tiefe.

In dieser Situation, mit der begrenzten Kenntnis des Spannungszustands in den Elementen einer Förderanlage in der Phase des Entwurfs und des Betriebs, scheint es problematisch und in manchen Fällen sogar unmöglich, Prognosen über die Zeitdauer ihres sicheren Betriebes zu stellen.

Für eine aussagefähige Berechnung nach der Methode der Finiten-Elemente für die Bestimmung der Grenzstände und Bewertung der Sicherheit solcher Konstruktionen, und die Anwendung der Methoden der Ermüdungsfestigkeit für die Festlegung der sicheren Betriebszeit, ist es notwendig:

1. Dynamische Analysen im Betrieb von diesen Elementen bei allen möglichen Betriebs- und Havariefällen durchzuführen.
2. Optimalbelastungen von einzelnen Elementen des Fördergefäßes als Funktion der Konstruktions- und Bewegungsparameter des Systems zu ermitteln.
3. Ermüdungsfestigkeitsanalyse von ausgewählten Elementen und Knotenpunkten des Fördergefäßes als Funktion ihrer Betriebszeit und der Art der Förderanlage durchzuführen.

Die Ergebnisse der Analysen, die in den Punkten 1-3 dargestellt wurde, bilden die Grundlage für die „Erstellung von Bewertungskriterien des technischen Zustands von Elementen des Fördergefäßes bei besonderer Berücksichtigung der Ermüdungsfestigkeit als Funktion der Betriebszeit und der Art der Förderanlage“.

Die Werte von tatsächlichen Belastungen der Elemente des Fördergefäßes wurden nach der Durchführung der dynamischen Analyse von Betriebsfällen ermittelt, was für den Fall der Notbremsung in den Artikeln /4/ und /7/ und während der Rangierbremsung und im normalen Betrieb in den Abhandlungen /2/ und /5/ dargestellt wurde. Die Ergebnisse von diesen Analysen wurden verifiziert, indem man die gemessenen Belastungen vom Hängezeug des Fördergefäßes in den analysierten Phasen des Betriebs der Förderanlage mit den Berechneten verglichen hat, worüber u.a. dieser Artikel berichtet.

2 Messungen von Kräften im Hängezeug des Fördergefäßes am realen Objekt während der Rangierbremsung.

Die erzielten Ergebnisse der durchgeführten theoretischen Analyse /2/ /4/ /5/ /7/ wurden mit Hilfe von Versuchen verifiziert, indem man Messungen von Kräften in ausgewählten Elementen des Hängezeugs des Gefäßes der Bergbauförderanlage während der Rangierbremsung am realen Objekt in einem Schacht eines polnischen Bergwerks durchgeführt hat.

2.1 Wichtige technische Daten der Förderanlage, auf der das Experiment durchgeführt wurde

Technische Daten:

Maschinentyp: 4L-4000/2900

Antrieb: Gleichstrommotor 2900 kW

Nennzahl: 77 min⁻¹

Höchstgeschwindigkeit des Schachtfördergefäßes: $v = 16$ m/s

Masse des vollständigen Gefäßes mit

Hängezeug: $m_{ku} = 16500$ kg

Nutzmasse: $m_u = 17000$ kg

Schwungmoment der Drehelemente (GD^2):

a) Schwungmoment der Trommel

$$GD_B^2 = 1868.8 \text{ [kNm}^2\text{]}$$

b) Schwungmoment des Motorrotors

$$GD_s^2 = 1275.3 \text{ [kNm}^2\text{]}$$

c) Schwungmoment der Lenkscheiben

$$GD_K^2 = 474 \text{ [kNm}^2\text{]}$$

2.2 Messstelle zur Registrierung der Kräfte im Hängezeug der Gefäße

Das Schema der Messstelle zur Registrierung der Kräfte im Hängezeug der Gefäße wurde auf **Bild 1 /2/** dargestellt. Die Messungen wurden mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen der WSP-Kraft mit folgenden technischen Daten durchgeführt:

Messbereich: 100 kN

Ausgangsspannung: 5 V

Genauigkeitsgrad: 0,6

Brückeneinspeisung: 5 V

Schema des Messpfades und der Anordnung von Dehnungsmessstreifen

9. Tragseil
8. Hochstädter-kabel
7. SRI-Abzweigkasten
6. WSP-Dehnungsmessstreifen
5. ZPR1 Registriergerät
4. Reguliereinlage
3. Zugband des Hängezeugs
2. Tragseil
1. Kopf des Schachtfördergefäßes

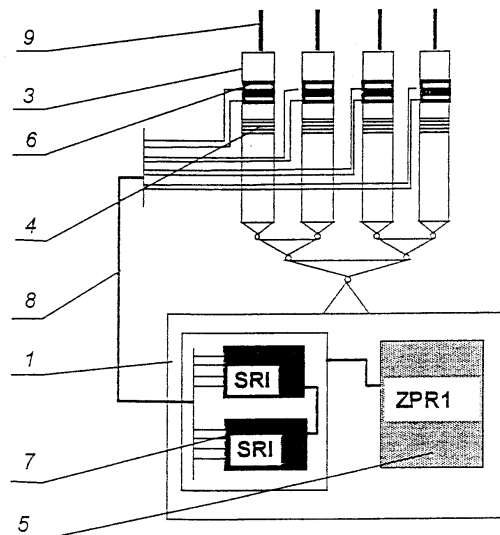


Bild 1: Schema des Messpfades und Anordnung von Dehnungsmessstreifen

Für die Registrierung von Signalen wurde die ZPR-1-Vorrichtung benutzt, die mittels des HP-Akkumulators mit der Spannung von 2,6÷12 V eingespeist wird. Die Messsignale von acht Dehnungsmessstreifen (je zwei pro Zugband) wurden mit der Frequenz von 40 kHz geprüft. Die von einzelnen Kanälen registrierten Signale wurden, in Textdateien konvertiert, summiert und weiter durch ein Matlab 5.2-Programm verarbeitet. Während aller Messungen wurde die Umfangsgeschwindigkeit auf der Treibscheibe registriert.

2.3 Ergebnisse der durchgeführten Messungen von Kräften im Hängezeug des Gefäßes während der Rangierbremsung.

In diesem Teil des Artikels beschränken wir uns auf die Darstellung der Messergebnisse von Kräften im Hängezeug des Fördergefäßes, dass auf die Hängebank während der Rangierbremsung der Förderanlage zufährt, die technischen Daten der Anlage wurden oben angegeben.

Auf **Bild 2** wurde mittels einer Strichlinie die tatsächliche Belastung des Hängezeugs während der Rangierbremsung beim Zufahren auf die Hängebank ($l_1=100\text{m}$) dargestellt.

Mittels der kontinuierlichen Linie stellte man hingegen die Änderung der Belastung des Hängezeugs des Gefäßes dar, die auf theoretischem Wege errechnet wurde /4/ und /5/.

Auf **Bild 3** wurde hingegen die Änderung der Belastung des Hängezeugs des Gefäßes während der Rangierbremsung dargestellt, die bei verschiedenen Geschwindigkeiten gemessen wurde (Betriebsgeschwindigkeiten) $V_0=V=10 \text{ m/s}$ (Strichlinie) und $V_0=V=16 \text{ m/s}$ (volle Linie). Die Entfernung des beladenen Fördergefäßes von der Treibscheibe betrug während der durchgeführten Rangierbremsung $l_1=540\text{m}$.

Die Ergebnisse der durchgeführten Messungen - im Betrieb auf die Messung von Kräften im Hängezeug des Gefäßes beschränkt - stimmen mit Ergebnissen von entsprechenden Simulationen überein, die sich auf die Ergebnisse der dynamischen Analyse von /4/ und /5/ stützen. Die Unterschiede im Verlauf der gemessenen und der theoretisch berechneten Zeitwerte der Lastgrößen, welche die Kräfte im Hängezeug der Gefäße bei der Rangierbremsung charakterisieren, weichen in Extremfällen nur einige Prozente ab (siehe Diagramm Bild 3).

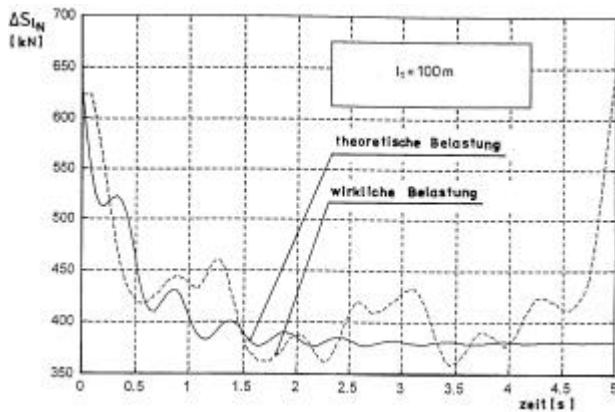


Bild 2: Diagramm der Änderung der Belastung des Hängezeugs des Gefäßes während der Rangierbremsung, wobei die Länge des Tragseils vom Gefäß zur Treibscheibe $l_1 = 100$ m beträgt.

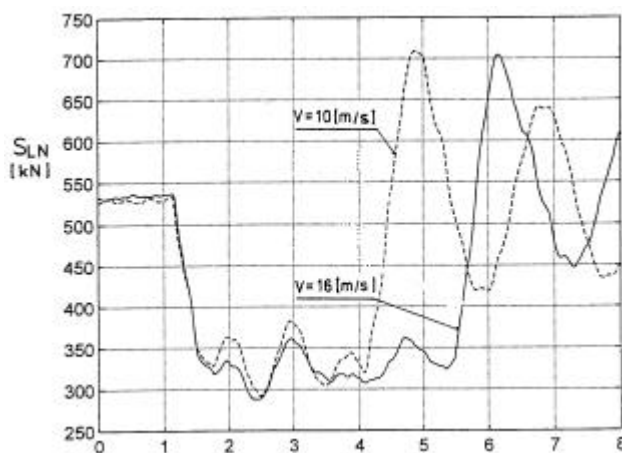


Bild 3: Änderung der Belastung des Hängezeugs des Fördergefäßes während der Rangierbremsung bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten der festgelegten Fahrt ($l_1 = 540$ m)

Außerdem, was zu betonen ist, hängt der Wert der dynamischen Überlast im Hängezeug des Gefäßes während der Bremsung nicht von der Geschwindigkeit der festgelegten Fahrt V_0 ab, bei der der Vorgang der Rangierbremsung begonnen hat.

3 Analyse des Spannungszustands in ausgewählten Elementen der Bergbauförderanlage.

Das Ziel der durchgeführten Festigkeitsanalyse von ausgewählten Elementen der Bergbauförderanlage (im Artikel auf Elemente des Hängezeugs der Fördergefäße und Unterseilen beschränkt) war, eine vollständige Informationen über den Spannungszustand zu bekommen, der in ihren Bestandteilen unter dem Einfluss von Betriebsbelastungen entsteht.

Die Kenntnis von Maximalwerten der Spannungs-komponenten in einem Element bildet die Grundlage für die Bewertung von dessen Festigkeit und Dauerhaftigkeit (der zulässigen Betriebsdauer).

Man analysierte die Belastungskomponenten des Hängezeugs, dass am Gefäß der Förderanlage befestigt wurde, an dem die Messungen ihrer Belastung im normalen Betrieb und auch während der Rangierbremsung durchgeführt wurden. Auf **Bild 4** wurde das Schema von diesem Hängezeug dargestellt. Es ist das Vierseilhängezeug mit Einpunktbefestigung am Fördergefäß.

Das auf Bild 4 dargestellte Hängezeug enthält folgende Elemente (die in der Ermüdungsfestigkeitsanalyse betrachtet wurden):

- Kreuzverbindungsstück (2),
- großer Winkelhebel (5),
- kleiner Winkelhebel (6),
- Außenlasche (3),
- Innenlasche (4).

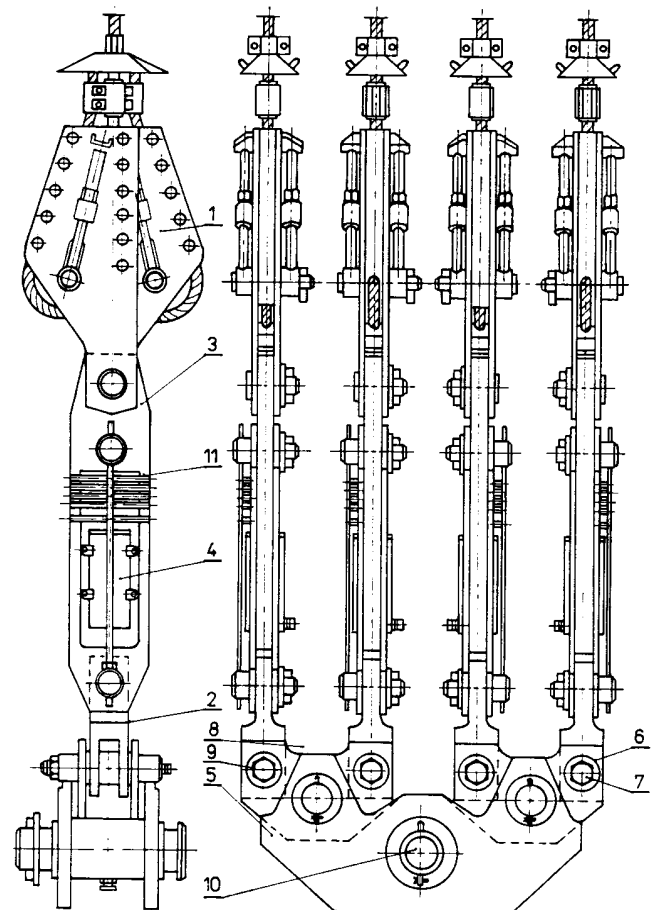


Bild 4: Konstruktionsschema des Vierseilhängezeugs mit Einpunktbefestigung am Fördergefäß

Die Belastungen aller Elemente des oben beschriebenen Hängezeugs bilden die durch die Trageile übertragenen Kräfte. In der **Tabelle 1** stellte man Nennbelastungen und Betriebsbelastungen (maximale und minimale) des analysierten Hängezeugs zusammen.

Analysiertes Hängezeug	Nennlast Q_n [kN]	Max. Last $Q_{e \max}$	Min. Last $Q_{e \min}$
Vierseilhängezeug mit Einpunktbefestigung am Fördergefäß	880	682,5	167,9

Tabelle 1: Lasten des analysierten Hängezeugs

Aufgrund der durchgeführten Analyse /3/ bekam man eine vollständige Information über den Spannungszustand in allen Knotenpunkten des Netzes, in das die Modelle der Hängezeugelemente eingeteilt wurden.

Auf **Bild 5** wurden beispielhaft Schichtlinien von Spannungskomponenten in einem der Hängezeugelemente dargestellt. Es sind reduzierte Spannungen (Vergleichsspannung), die mit Hilfe der Huber-Hypothese (Von Mises) errechnet wurden.

In der **Tabelle 2** wurden hingegen, für ausgewählte Elemente des analysierten Hängezeugs, die für sie berechneten Maximalwerte der reduzierten Spannung dargestellt, die durch die entsprechende maximal zulässige statische Belastung (Nennbelastung) Q_n , beziehungsweise durch die maximale Betriebsbelastung Q_e hervorgerufen wurden.

Name des Elements	Nennbelastung $Q_n=880$ kN			Betriebsbelastung $Q_e = 683$ kN		
	Sicherheitsfaktor			Sicherheitsfaktor		
	Max. reduzierte Spannung σ_{zn} [MPa]	$n_{1n}=R_e/\sigma_{zn}$	$n_{2n}=R_m/\sigma_{zn}$	Max. reduzierte Spannung [MPa]	$n_{1e}=R_e/\sigma_{ze}$	$n_{2e}=R_m/\sigma_{ze}$
großer Winkelhebel	72	3,8	7,2	56	4,9	9,3
kleiner Winkelhebel	97	2,8	5,4	75	3,7	6,9
Innenlasche	109	2,5	4,8	85	3,2	61
Außenlasche	75	3,7	6,9	58	4,7	9,0
Kreuzverbindungsstück	103	2,78	5,0	80	3,4	6,5

Tabelle 2: Maximalwerte der Vergleichsspannungen nach v. Mises für das Vierseilhängezeug mit Einpunktbefestigung am Fördergefäß

In dieser Tabelle wurden auch die Werte von entsprechend berechneten Sicherheitsfaktoren angegeben. Die Werte von diesen Faktoren wurden ermittelt als Verhältnis der maximalen Spannung in einem Element zu der Fließgrenze $R_e = 275$ MPa, beziehungsweise zu der jeweiligen Zugfestigkeit des Werkstoffes $R_m = 520$ MPa, aus dem die Elemente des analysierten Hängezeugs hergestellt wurden d.h. der Stahlsorte 35.

Die für die einzelnen mit der Betriebsbelastung belasteten Elemente ermittelten Sicherheitsfaktoren liegen in den Grenzen $n_n = 2.5 \div 3.8$ im Bezug auf die maximalen Vergleichsspannungen und Fließgrenze, und $n_e = 6.1 \div 9.3$ beim Vergleich von diesen Spannungen mit der jeweiligen Zugfestigkeit.

4 Zusammenfassung

Die Erstellung von Kriterien zur Bewertung des technischen Zustands von Elementen der Bergbauförderanlage, darunter des Hängezeugs der Fördergefäße und der Unterseile, mit besonderer Berücksichtigung der Ermüdungsfestigkeit als Funktion der Betriebszeit und der Art der Förderanlage, erfordert die Durchführung einer gründlichen Ermüdungsfestigkeitsanalyse, die tatsächliche Belastungen und Änderungen der Belastung in der Zeit berücksichtigt.

Man kann diese Berechnungen aber nicht ohne eingehende Untersuchungen der Dynamik der Vorgängen, die im normalen Betrieb oder bei Havariefällen ablaufen, aufstellen. Die durchgeführten dynamische Analysen und Messungen ergaben die

Funktion der Belastungen von ausgewählten Elementen der Vorrichtung für den vollen Betriebszyklus. Die durchgeführten Festigkeitsberechnungen von ausgewählten Hängezeugelementen des Fördergefäßes erlaubten es hingegen, aufgrund von ermittelten Maximalwerten der Belastungen, den Spannungszustand im ganzen Bereich des analysierten Hängezeugelements zu bestimmen. Auf dieser Grundlage wurde es möglich,

den auf die Dehngrenze und die jeweilige Festigkeit bezogenen Sicherheitsfaktor zu berechnen.

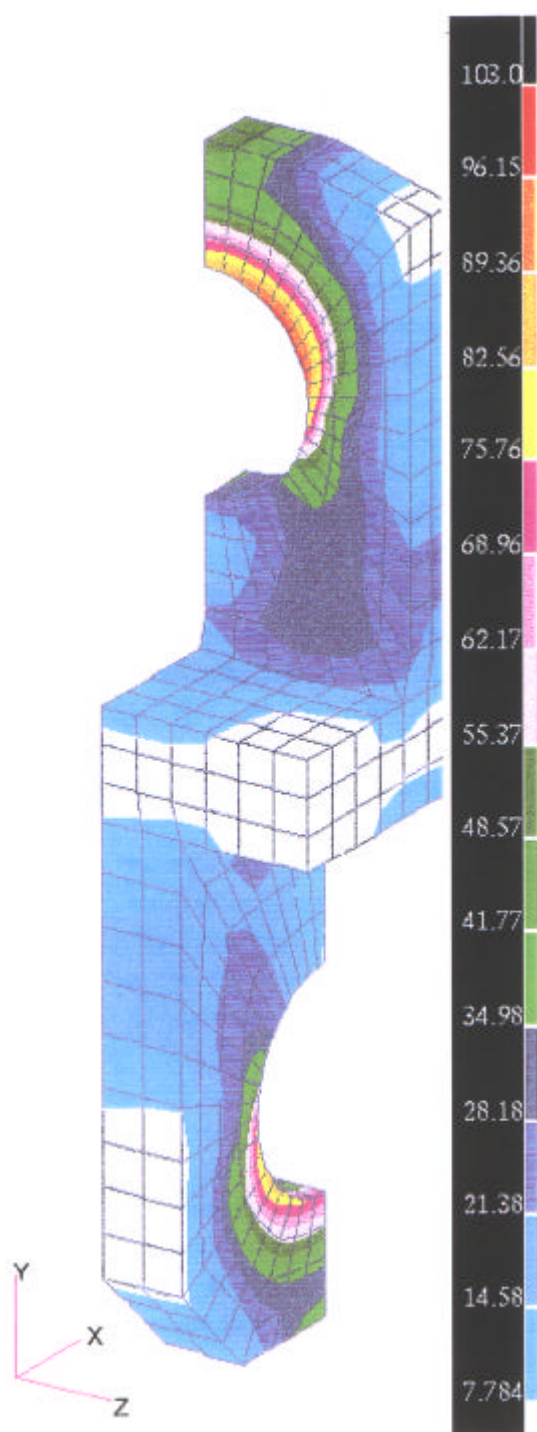


Bild 5: Kreuzverbindungsstück. Verteilung der reduzierten Spannung σ_z .

5 Literatur

- /1/ Gerlich A., Horstmann R.: Seilrutschverhalten von Treibscheibenanlagen unter Berücksichtigung dynamischer Vorgänge. Glückauf - Forschungshefte 54, Nr.5 1999 S. 213÷218
- /2/ Smieja M.: Analytische und experimentelle Beurteilung von Sicherheitsfaktoren der ausgewählten Elemente des Bergbauförderanlage. Doktorarbeit, AGH, unveröffentlicht Kraków S. 1÷88. 2000.
- /3/ Wolny S., Dzik S., Die Prüfung des Spannungszustands in den Hängezeugelementen der Bergbauförderanlagen. Die 13. Tagung der Experimentalmechanik des Festkörpers Jachranka 1998, S. 455÷460
- /4/ Wolny S.: Dynamische Belastungen im Hängezeug der Fördergefäße und Unterseile während der Notbremsung der Bergbauförderanlage. ZN AGH Vierteljahresschrift Mechanika B.19, Heft 1 Kraków 2000, S.121÷130
- /5/ Wolny S.: Ausgewählte Probleme der Dynamik und Festigkeit beim Betrieb von Bergbauförderanlagen. Monographien „Probleme der Mechanik und Robotik“ Nr. 1, Herausgeber Fakultät für Mechanik und Robotik AGH, Kraków 2000, S. 1÷123
- /6/ Anhang Nr. 17 zur Anordnung des Industrieministers vom 14.04.1995 „ Anforderungen im Bereich der Konstruktion und Bedienung der Bergbauförderanlagen“.
- /7/ Siemieniec, A., Wolny S.: Analyse der Arbeitsverhältnisse einer Förderanlage während einer Notbremsung. Institut für Maschinenwesen. Mitteilung Nr. 24 (1999) TU Clausthal S. 159ff.

