

SPANNUNGSOPTISCHE PRÜFUNGEN AN GESCHLOSSENEN STANGENKÖPFEN, II

Von

Á. ZSÁRY

Lehrstuhl für Maschinenelemente, Technische Universität,
Budapest

(Eingegangen am 29. Februar 1964)

Vorgelegt von Prof. Dr. I. Vörös

Im ersten Teil dieser Arbeit wurden Prüfungen der mechanischen und optischen Kenngrößen von Kunststoffen behandelt, die als Prüfmodelle Verwendung fanden. Desgleichen wurden die Ergebnisse dieser Prüfungen erörtert. Es wurden weiterhin die Prüfeinrichtungen, die Einspann- und Belastungsvorrichtungen beschrieben, ebenso die Druckbelastungsprüfungen und deren Ergebnisse.

Im zweiten Teil werden nun die Zugbelastungsprüfungen und ihre Auswertung behandelt, wobei auch auf Fragen der Bemessung eingegangen wird.

I. Zugbelastungsprüfungen

Bei Zugbeanspruchung gelangt der Stangenkopf erwartungsgemäß in einen wesentlich ungünstigeren Spannungszustand als bei Druckbelastung. An mehreren Stellen des Stangenkopfes treten Spannungsspitzen auf, die bei seiner Bemessung zu berücksichtigen sind.

Im Verlauf der Messungen war jedes einzelne Modell mit einer Zugkraft von $P_t = 66$ kg belastet. Die Prüfung erstreckte sich auf die Ermittlung von Spannungswerten an den äußeren Fasern des Modells, des Querschnitts 0—0 der waagrechten und des Querschnitts 1—1 der senkrechten Symmetrieebene, an der unbelasteten, dem Belastungspunkt entgegengesetzten Stelle der Bohrung (Abb. 1, Punkt 3), sowie auf die Werte der Spannungsspitzen, die an den abgerundeten Übergangsstellen zwischen Kopf und Schaft auftreten.

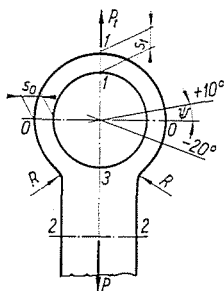


Abb. 1. Prüfstellen am geschlossenen Stangenkopf

Die geometrischen Abmessungen der einzelnen Modellformen enthält der erste Teil der Mitteilung (Periodica Polytechnica III, 1964). Ihre Kennwerte sind in der hier folgenden Tabelle zusammengefaßt.

	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 6	M 7	M 8	M 9	M 10
s_0 mm	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
s_t mm	7	7	7	7	7	7	7	9	15	20
R mm	0	2	4	7	15	30	40	40	80	40

Die Isochromaten mit ihren Spannungswerten sind in der Dimension kp/cm^2 für Modell M 6 als Beispiel in den Abbildungen 2, 3 und 4 dargestellt.

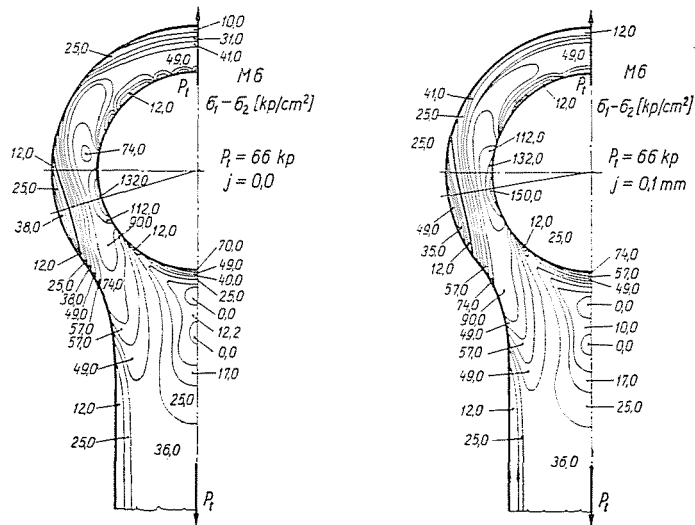


Abb. 2. Isochromaten-Schaubild des geschlossenen Stangenkopfmodells M 6, Zapfenspiel: a) $j \cong 0$, b) $j = 0,1$ mm

In Abbildung 5 sind die obigen Spannungswerte in Abhängigkeit vom Zapfenspiel anhand der Isochromaten-Schaubilder als Beispiel für das Modell M 6 dargestellt.

Die Kennwerte der Spannungsverteilung bei den einzelnen Modellen enthält Tabelle I in den Dimensionen kp/cm^2 oder mm.

Im Zusammenhang mit den Prüfungen können die wichtigsten Ergebnisse wie folgt zusammengefaßt werden.

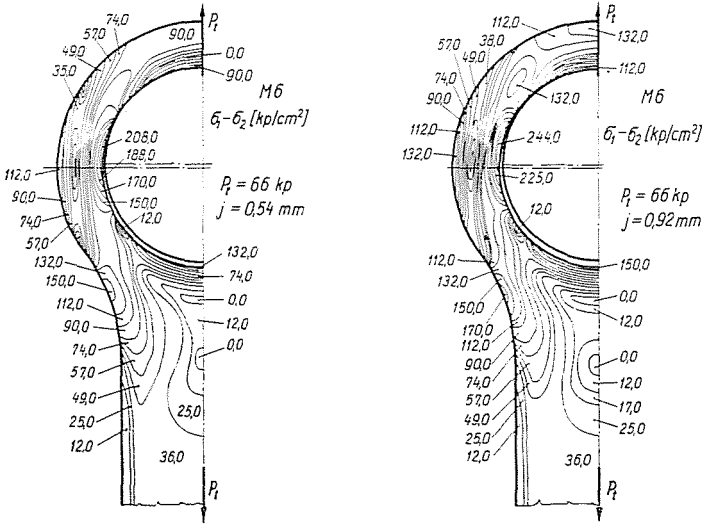


Abb. 3. Isochromaten-Schaubild des geschlossenen Stangenkopfmodells M 6, Zapfenspiel: a) $j = 0,54$ mm, b) $j = 0,92$ mm

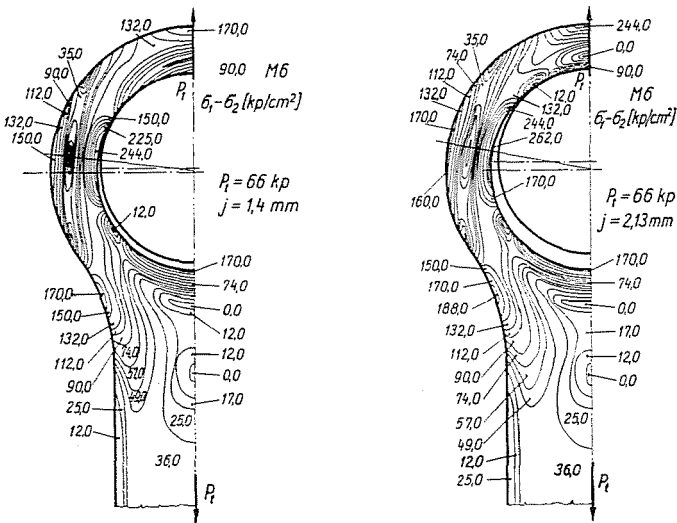


Abb. 4. Isochromaten-Schaubild des geschlossenen Stangenkopfmodells M 6, Zapfenspiel: a) $j = 1,4$ mm, b) $j = 2,13$ mm

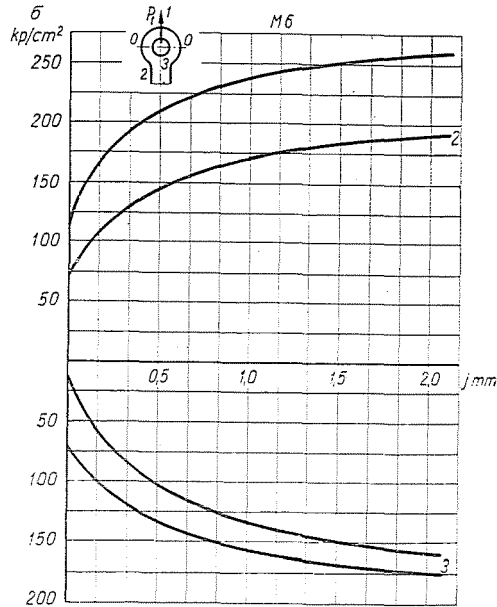


Abb. 5. Zusammenhang zwischen Spannungswerten am Modell M 6 und Zapfenspiel

2. Prüfergebnisse

a) Durch Zug- und Biegebeanspruchung des Stangenkopfs entsteht im Querschnitt 0—0 eine unbelastete, neutrale Faser $\sigma_1 - \sigma_2 = 0$, und zwar an den Stangenschäften an beiden Seiten der Stangenöse. Gestalt und Lage der Faser ändert sich in Abhängigkeit von der Zapfenspielgröße. Bei kleinem Zapfenspiel durchdringt die Faser den Querschnitt 0—0 nicht. Der auf die Faser senkrecht stehende Radius liegt innerhalb eines Kreissektors von etwa -20° und $+10^\circ$ zu beiden Seiten der waagrechten Achse, und bildet einen Winkel ψ (Abb. 1). Bei den größten Spielwerten (etwa um 2,1 mm) liegt dieser — je nach Modellausführung — etwa 10° über der waagrechten Achse. Bei kleinerem Spiel liegt der auf die Faser senkrechte Radius unterhalb der waagrechten Achse. Entsprechend liegt der größte Spannungswert von mehreren geprüften Modellen, insbesondere bei geringem Spiel, nicht im Querschnitt 0—0, sondern an tiefer befindlichen Stellen des Modells.

b) Die Punkte höchster Beanspruchung der beiden Stangenkopfschäfte befinden sich in der Umgebung der waagrechten Bohrungsschäfte, also dort, wo die Zugspannung entsteht. Bezogen auf die Modellserien, ist der Wert dieser Zugspannungen gleich bei den Modellen M 1 — M 4, das heißt bis zu einem Übergangsradius von $R = 7$ mm. Bei den übrigen Modellen, bei denen sich die Übergangswölbung abflacht, sinkt die Spitze der Spannung, und

Tabelle I

Zapfen- spiel	Querschnitt 0-0		ψ in Graden	Auf die Faser $\sigma_1 - \sigma_2 = 0$ senkrechter Querschnitt		Querschnitt* 1-1		σ_{ny} in Punkt 3	σ_{max} Über- gang in Punkt 2
	σ_{cL}	σ_{cH}		σ_L	σ_H	σ_{1L}	σ_{1H}		
M 1									
0,0	0,0	93,0	-20,5°	-35,7	150,0	12,0	57,0	-60,0	153,0
0,28	-41,0	132,0	-17°	-57,0	150,0	12,0	57,0	-112,0	188,0
0,58	-112,0	208,0	-7°	-112,0	208,0	52,0	90,0	-135,0	225,0
0,85	-170,0	244,0	0°	-170,0	244,0	132,0	112,0	-170,0	244,0
1,68	-225,0	281,0	7°	-225,0	281,0	225,0	170,0	-170,0	281,0
2,16	-244,0	281,0	9°	-244,0	281,0	262,0	170,0	-170,0	319,0
M 2									
0,0	0,0	132,0	-20°	-49,0	170,0	12,0	41,0	-57,1	150,0
0,1	-41,0	170,0	-15°	-57,0	188,0	12,0	49,0	-90,0	170,0
0,54	-112,0	225,0	-10°	-112,0	225,0	57,0	57,0	-150,0	225,0
0,92	-132,0	244,0	0°	-132,0	244,0	132,0	90,0	-170,0	244,0
1,4	-170,0	262,0	+4°	-170,0	262,0	208,0	150,0	-208,0	262,0
2,13	-188,0	281,0	+9°	-188,0	281,0	281,0	188,0	-225,0	281,0
M 3									
0,0	0,0	132,0	-23°	-41,0	170,0	12,0	37,0	-57,1	150,0
0,1	-41,0	150,0	-15°	-57,1	170,0	12,0	41,0	-74,0	170,0
0,58	-90,0	208,0	-7,5°	-112,0	208,0	49,0	90,0	-132,0	225,0
0,85	-132,0	244,0	0°	-132,0	244,0	90,0	112,0	-160,0	244,0
1,68	-208,0	262,0	+4°	-208,0	262,0	208,0	132,0	-170,0	262,0
2,16	-208,0	281,0	+8,5°	-208,0	281,0	262,0	208,0	-170,0	262,0
M 4									
0,0	0,0	132,0	-20°	-49,0	150,0	12,0	35,7	-57,1	132,0
0,1	-41,0	150,0	-14°	-57,1	170,0	12,0	49,0	-90,0	150,0
0,54	-112,0	208,0	-5°	-90,0	208,0	74,2	90,0	-132,0	208,0
0,92	-150,0	244,0	+1°	-150,0	244,0	170,0	112,0	-170,0	225,0
1,4	-170,0	262,0	+6°	-170,0	262,0	170,0	112,0	-180,0	225,0
2,13	-208,0	281,0	+9°	-208,0	281,0	244,0	150,0	-208,0	244,0
M 5									
0,0	0,0	132,0	-18°	-35,7	150,0	12,0	49,0	-72,0	112,0
0,1	-57,0	150,0	-12°	-74,2	170,0	12,0	49,0	-90,0	132,0
0,54	-132,0	208,0	0°	-132,0	208,0	112,0	74,2	-150,0	188,0
0,92	-150,0	225,0	+5,5°	-150,0	225,0	150,0	74,2	-150,0	208,0
1,4	-150,0	244,0	+8°	-170,0	244,0	208,0	132,0	-170,0	215,0
2,13	-170,0	262,0	+11°	-188,0	262,0	225,0	170,0	-170,0	225,0

Zapfen- spiel	Querschnitt 0—0		ψ in Graden	Auf die Faser $\sigma_1 - \sigma_2 = 0$ senkrechter Querschnitt		Querschnitt ^a 1—1		σ_{Mittel} in Punkt 3	σ_{max} Über- gang in Punkt 2
	σ_{ek}	σ_{eb}		σ_k	σ_b	σ_{1k}	σ_{1b}		
M 6									
0,0	-12,0	112,0	-17°	-38,0	132,0	12,0	49,0	-70,0	74,2
0,1	-35,0	132,0	-9°	-49,0	150,0	12,0	49,0	-74,2	90,0
0,54	-112,0	208,0	0°	-112,0	208,0	90,0	90,0	-132,0	150,0
0,92	-132,0	225,0	+7°	-132,0	244,0	132,0	112,0	-150,0	170,0
1,4	-150,0	144,0	+9°	-150,0	244,0	170,0	90,0	-170,0	170,0
2,13	-160,0	262,0	+12°	-170,0	262,0	244,0	90,0	-170,0	188,0
M 7									
0,0	0,0	112,0	-17°	-25,0	132,0	12,0	57,0	-57,0	56,0
0,1	-41,0	145,0	-8°	-57,0	150,0	12,0	57,0	-90,0	90,0
0,54	-112,0	208,0	+4°	-112,0	208,0	90,0	57,0	-132,0	132,0
0,92	-125,0	237,0	+8°	-144,0	237,0	162,0	70,0	-162,0	155,0
1,4	-150,0	244,0	+10°	-150,0	244,0	188,0	180,0	-162,0	170,0
2,13	-150,0	244,0	+16°	-150,0	244,0	208,0	150,0	-170,0	175,0
M 8									
0,0	12,0	132,0	-17°	-17,0	132,0	12,0	49,0	-74,2	41,0
0,1	-41,0	150,0	-4°	-52,0	150,0	25,0	49,0	-90,0	74,0
0,54	-112,0	208,0	+4°	-112,0	208,0	112,0	90,0	-150,0	132,0
0,92	-132,0	225,0	+7°	-132,0	225,0	150,0	132,0	-170,0	140,0
1,4	-132,0	208,0	+9°	-140,0	244,0	188,0	132,0	-170,0	150,0
2,13	-132,0	225,0	+10°	-150,0	244,0	208,0	225,0	-170,0	150,0
M 9									
0,0	0,0	120,0	-10°	-11,0	120,0	13,0	38,0	-68,5	56,0
0,21	-53,0	162,0	-1°	-53,0	162,0	13,0	44,0	-97,0	80,0
0,3	-62,0	175,0	0°	-62,0	175,0	44,0	62,0	-105,0	93,0
0,75	-68,0	182,0	+1°	-68,0	182,0	62,0	93,0	-120,0	97,0
1,13	-74,0	204,0	+2°	-74,0	204,0	80,0	98,0	-120,0	97,0
1,61	-80,0	204,0	+2°	-80,0	204,0	80,0	98,0	-120,0	97,0
M 10									
0,0	+37,0	102,0	-18°	-24,0	102,0	12,0	60,0	-60,0	20,0
0,06	-12,0	112,0	-6°	-16,0	112,0	12,0	35,0	-90,0	36,0
0,5	-70,0	150,0	0°	-70,0	150,0	24,0	60,0	-124,0	60,0
0,73	-70,0	162,0	0°	-70,0	162,0	24,0	60,0	-124,0	70,0
1,61	-70,0	162,0	0°	-70,0	162,0	37,0	86,0	-124,0	70,0
2,03	-70,0	162,0	0°	-70,0	162,0	37,0	100,0	-124,0	70,0

* In der ersten Kolonne befinden sich die in der äußeren Faser auftretenden Spannungen in Querschnitt 1—1. Die zweite Kolonne enthält entweder die größte Hauptspannungsdifferenz $\sigma_1 - \sigma_2$, oder die bei einer Faser $\sigma_1 - \sigma_2 = 0$ in der inneren Faser entstehenden $\sigma_1 - \sigma_2$ Spannungswerte.

zwar bei Modell M 10 bereits um rund 30%. Abbildung 6 veranschaulicht die Änderung der größten Zugbelastungsspannung, die in der inneren Faser der Bohrung in Abhängigkeit vom Zapfenspiel entsteht, und zwar in einer für sämtliche Modelle gültigen Form.

Die Druckspannung, die in der äußeren Faser im Umkreis um die waagrechte Achse entsteht, ist kleiner als die innere Zugspannung. Der Unterschied zwischen den beiden Werten hängt wesentlich von der Größe des Spieles

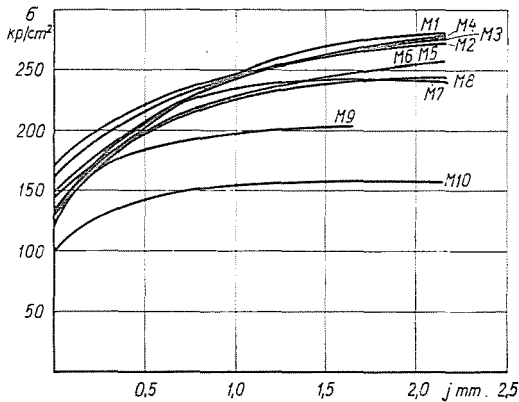


Abb. 6. Größte Zugspannung bei geschlossenen Stangenköpfen, wie sie in der inneren Faser der Bohrung, in Abhängigkeit vom Zapfenspiel entsteht

ab. Bei einem Modelltyp mit geringem Spiel ergibt sich der größte Unterschied, der allerdings bei einer Vergrößerung des Spieles kleiner wird. Bei Prüfung der einzelnen Modelltypen verhielten sich in dieser Hinsicht die Modelle M 9 und M 10 am günstigsten. Bei ihnen wurde der kleinste Spannungswert festgestellt, und zwar sowohl in der äußeren als auch in der inneren Faser und unabhängig von der Gleichheit des 0—0-Querschnittes in bezug auf die übrigen Modelle.

c) An der Stelle der Stangenkopfbohrung, die dem Kräfteangriffspunkt gegenüber liegt, also an Punkt 3, entsteht Druckspannung, deren Größe vom Zapfenspiel abhängt. Aus Tabelle I ist jedoch ersichtlich, daß die Spannungen, ausgenommen die Modelle M 9 und M 10, gleiche Werte haben (bedeutendere Abweichungen ergeben sich bei M 2 und M 4). Die Spannung erhöht sich bis zu einem Spiel von etwa 0,8 . . . 0,9 mm, um bei größerem Zapfenspiel in wesentlichen konstant zu bleiben. Bei den Modellen M 9 und M 10 wirkt sich der verstärkte Teil am oberen Stangenkopf auch auf den Spannungszustand dieses Punktes aus, so daß die im Punkt 3 auftretenden Spannungswerte wesentlich kleiner sind als die Spannungswerte der übrigen Modelle.

d) In dem in die Kraftlinie fallenden Querschnitt 1—1 kommt bei kleinem Zapfenspiel keine Faser $\sigma_1 - \sigma_2 = 0$ bzw. keine schwarze Linie im farbigen

Isochromaten-Schaubild zustande. Dieser Umstand erklärt sich daraus, daß die Zugbelastung dort größer ist als die Biegebeanspruchung. Durchschnittlich entsteht bei einem Spiel über 0,5 mm im Querschnittsinneren bereits ein Feld $\sigma_1 - \sigma_2 = 0$. Die Entstehung dieses Feldes wird jedoch durch die wachsende Konzentration der Oberflächenbelastung stark gestört. Bemerkenswert ist, daß bei den Modellen M 9 und M 10, bei denen der Kopf nicht von konzentrischen Kreislinien begrenzt ist (er besitzt im Querschnitt 1—1 eine Verstärkung), von der Bildung solcher Fasern $\sigma_1 - \sigma_2 = 0$ — selbst bei großem Zapfenspiel (2 mm) — nicht gesprochen werden kann.

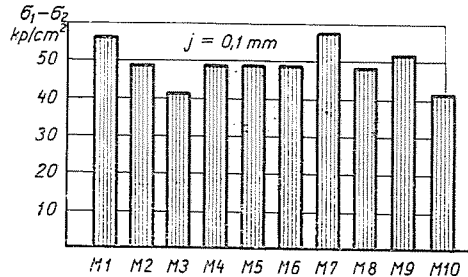


Abb. 7. Größter $(\sigma_1 - \sigma_2)$ -Wert im Querschnitt 1—1 bei einem Zapfenspiel von 0,1 mm

Bei einem als üblich zu bezeichnenden Zapfenspiel von 0,1 mm, weichen die größten Unterschiedswerte $\sigma_1 - \sigma_2$ der Hauptspannung im Querschnitt 1—1, die im gegenwärtigen Fall der als Bemessungsgrundlage dienenden Vergleichsspannung gleich sind bei den verschieden ausgebildeten Modellen bis zu einem gewissen Grad voneinander ab. Diese Abweichung ist jedoch unbedeutend, das heißt bei einem Spiel dieser Größenordnung üben die Formen keinen Einfluß aus (Abb. 7). Bei größeren Zapfenspielen liegen jedoch die Dinge anders.

e) Bei Prüfung der äußeren Faser des Stangenkopfquerschnitts 1—1 ergab sich — bezogen auf sämtliche Modelle —, ein kleiner Spannungswert, und zwar nicht nur in spielfreiem Zustand, sondern auch bei dem in der Praxis üblichem Spiel von 0,1 mm. Bei größerem Spiel erhöht sich auch die Spannung. Den günstigsten Fall boten selbstverständlich unter sämtlichen Modellen die Typen M 9 und M 10.

f) Mit besonderer Sorgfalt wurden die Spannungen an den Wölbungen der Querschnittübergänge geprüft. Auf den Stangenkopf bezogen, kann sich nämlich hier der höchste Wert ergeben. Unseren Messungen zufolge ergab sich bei den Modellen M 1 und M 2, bei denen die Übergangsrundung $R = 0$ oder $R = 2$ mm beträgt, tatsächlich der höchste Spannungswert. Sobald sich der Wert des Krümmungsradius erhöht, sinkt die Spannungsspitze. Ein Modell wurde bei vergrößertem Zapfenspiel geprüft; es ergab sich dabei eine wesent-

liche Erhöhung der Spannungsspitze. Die größte Spannung, die sich bei einzelnen Modellen in Abhängigkeit vom Spiel ergibt, ist aus Abbildung 8 ersichtlich.

Zwecks Erleichterung der Bemessung ist es angezeigt, bei den Querschnittsübergängen den Formfaktor zu bestimmen, der Formfaktor wie folgt definiert werden kann: Dividiert man den Zugkraftwert durch den Wert des Schaftquerschnitts, erhält man die reine Zugspannung als Nennspannung,

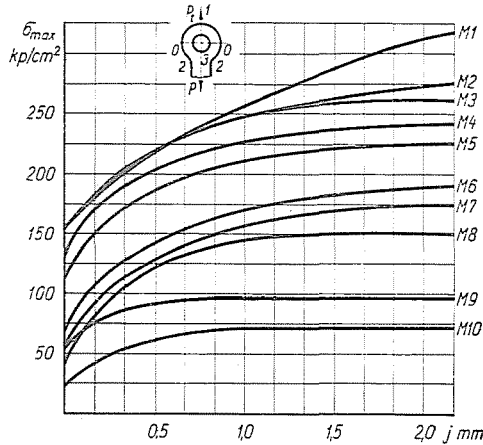


Abb. 8. Zusammenhang zwischen der am Schaftübergang entstehenden größten Tangentialspannung und dem Zapfenspiel

auf die der Spannungsspitzenwert am Übergang bezogen wird. Beträgt als der Schaft querschnitt

$$F = 0,8 \cdot 2,5 = 2 \text{ cm}^2,$$

ist

$$\sigma_n = \frac{66}{0,8 \cdot 2,5} = 33 \text{ kp/cm}^2,$$

woraus sich der Formfaktor zu

$$\alpha_k = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n} = \frac{\sigma_{\max}}{33}$$

ergibt.

Aus der Ausgleichskurve σ_{\max} der Meßwertstreuung können die einzelnen α_k -Werte bestimmt werden. Diese sind gemeinsam mit den geometrischen Kennwerten in Tabelle II zusammengefaßt und den Diagrammen der Abbildung 9 dargestellt.

Tabelle II

Spiel	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 6	M 7	M 8	M 9	M 10
0,0	4,55	4,55	4,55	4,1	3,4	2,24	1,7	1,25	1,7	0,62
0,1	5,2	5,15	5,15	4,55	3,97	2,88	2,35	2,27	2,12	1,17
0,5	6,67	6,65	6,52	6,06	5,6	4,4	3,78	3,54	2,82	1,82
s_1/d	0,234	0,234	0,234	0,234	0,234	0,234	0,234	0,234	0,234	0,234
s_1/h	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
r/h	∞	0,08	0,16	0,28	0,6	1,2	1,6	1,6	2,96	1,6
s_1/s_0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,28	1,88	3,0

Bedeutung der Buchstaben in Tabelle II: R = Radius an den Übergangswölbungen, s_1 Schaftstärke im Querschnitt 1—1, s_0 = Schaftstärke im Querschnitt 0—0, d = Durchmesser der Zapfenbohrung, h = Breite des Stangenschaftes.

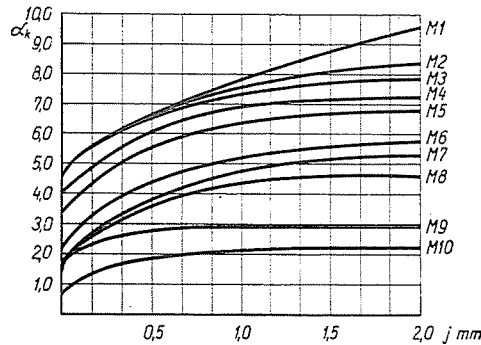


Abb. 9. Der am Schaftübergang gültige Zugbelastungs-Formfaktor

Wie ersichtlich, üben sowohl die Größe des Wölbungsradius als auch der Wert des Zapfenspiels auf die Spannungsverteilung σ_{\max} einen wesentlichen Einfluß aus.

g) Bei der Bemessung spielt außer der Kontrolle des Schaftübergangsquerschnitts die Kontrollrechnung des Stangenknopfquerschnitts 0—0 eine wesentliche Rolle. Aus den Prüfergebnissen ist ersichtlich, daß die Spannungsverteilung den Biegebeanspruchungen entsprechend verläuft. In einigen Werten weicht sie davon insofern ab, als der Punkt mit dem größten Spannungswert nicht in den Querschnitt 0—0, sondern lediglich in dessen Umgebung fällt. Bei den ausgeführten Pleuelstangen kann das Zapfenspiel zwischen 0,01 und 0,2 mm liegen. Bei einem Eisenbahn-Triebwagen-Dieselmotor beträgt z. B. die Abmessung des Kolbenbolzens $62^{+0,010}_0$, die Toleranz der Bohrung hingegen $62^{+0,105}_{+0,085}$. Das größte Spiel beträgt also rund 0,1 mm.

Bei einem Spiel dieser Größenordnung beträgt ψ bei den Modellen M 1 — M 7 durchschnittlich 10° . Bei den Modellen M 8 — M 10 ist $\psi = 5^\circ$.

Wird die in Abhängigkeit vom Spiel in der inneren Faser festgestellte Zugspannung in ein Diagramm eingezeichnet, lassen sich die Spannungswerte an den Werten 0, 0,1 und 0,2 tabellarisch erfassen. Wird die Belastung im Querschnitt 0—0 als reine Zugbelastung angenommen, schreibt sich die entstehende Spannung zu

$$\sigma_n = \frac{P}{2b \cdot s} = \frac{66}{2 \cdot 0,8 \cdot 0,7} = 59 \text{ kp/cm}^2.$$

Bezieht man nun auf diese Spannung eine in der inneren Faser entstehende Spannungsspitze, kann ein Formfaktor wie folgt definiert werden:

$$\alpha_k = \frac{\sigma_{0b}}{\sigma_n}$$

dessen Werte Tabelle III enthält.

Tabelle III

Spiel	M 1		M 2		M 3		M 4		M 5	
	σ_b	α_k	σ_b	α_k	σ_b	α_k	σ_b	α_k	σ_b	α_k
0	150,0	2,54	170,0	2,88	170,0	2,88	150,0	2,54	150,0	2,54
0,1	160,0	2,71	185,0	3,15	175,0	2,97	165,0	2,80	165,0	2,80
0,2	170,0	2,88	200,0	3,39	185,0	3,15	175,0	2,97	175,0	2,97

Spiel	M 6		M 7		M 8		M 9		M 10	
	σ_b	α_k	σ_b	α_k	σ_b	α_k	σ_b	α_k	σ_b	α_k
0	132,0	2,22	132,0	2,22	132,0	2,22	120,0	2,03	100,0	1,70
0,1	150,0	2,54	150,0	2,54	150,0	2,54	150,0	2,54	115,0	1,95
0,2	165,0	2,80	170,0	2,88	165,0	2,80	165,0	2,80	125,0	2,12

In der äußeren Faser tritt eine Druckspannung auf, deren Höchstwerte in Anlehnung an obige Ableitungen auf Grund der Tabellenwerte als Funktion des Spiels in ein Diagramm aufgetragen werden können. Aus den Spannungswerten des Diagramms läßt sich ebenfalls ein Formfaktor bestimmen, der unter Voraussetzung einer gleichmäßigen Spannungsverteilung und, bezogen auf den weiter oben definierten Faktor σ_n , wie folgt lautet:

$$\alpha_k = \frac{\sigma_k}{\sigma_n}.$$

Tabelle IV

Spiel mm	M 1		M 2		M 3		M 4		M 5	
	σ_k	α_k	σ_k	α_k	σ_k	α_k	σ_k	α_k	σ_k	α_k
0	-35,7	0,606	-49,0	0,83	-41,0	0,695	-49	0,83	-45,0	0,765
0,1	-50,0	0,85	-60,0	1,02	-57,0	0,965	-63	1,07	-70,0	1,19
0,2	-65,0	1,1	-70,0	1,19	-70,0	1,19	-75	1,27	-85,0	1,44

Spiel mm	M 6		M 7		M 8		M 9		M 10	
	σ_k	α_k	σ_k	α_k	σ_k	α_k	σ_k	α_k	σ_k	α_k
0	-38,0	0,645	-25,0	0,425	-17,0	0,288	-11,0	0,187	-15,0	0,255
0,1	-53,0	0,9	-55,0	0,93	-52,0	0,88	-40,0	0,68	-25,0	0,425
0,2	-65,0	1,1	-70,0	1,19	-60,0	1,02	-55,0	0,93	-40,0	0,68

Wie ersichtlich, ist die in der äußeren Faser entstehende Spannung kleiner als der Nennwert der Zugspannung. Die tatsächliche Beanspruchung verschiebt sich also aus der äußeren in die innere Faser.

3. Beziehungen im Hinblick auf die Bemessung geschlossener Stangenköpfe

Bei der Bemessung geschlossener Stangenköpfe ergeben sich in der Praxis verschiedene brauchbare Zusammenhänge. Diese Zusammenhänge beruhen auf gewissen Näherungen und Annahmen.

Die Hauptbeanspruchung des geschlossenen Kopfes ruft die im oberen Totpunkt wirkende Massenkraft als Zugbelastung hervor (einen Viertakt-Motor vorausgesetzt), da die aus dem Verbrennungsdruck resultierende Kraft im wesentlichen den Stangenschaft preßt. Unter der Einwirkung der Zugkraft verformt sich die Stangenöse und stützt sich am Kolbenbolzen ab. Aus diesem Grund hängt die Beanspruchung einerseits vom Zapfenspiel, andererseits vom Übergang zwischen Öse und Schaft ab.

Die einzelnen üblichen Bemessungsgrundsätze gestalten sich folgendermaßen:

3.1 Bei den Berechnungen wird vorausgesetzt, daß die Belastung als *konzentrierte Kraft* wirkt. Die Öse kann als statisch unbestimmter Ring angenommen werden, den die Massenkraft P_t von innen belastet. Die Ringwand kann als Krummträger bemessen werden, der in den Querschnitt 0—0 eingefäßt ist (Abb. 10).

Den eingespannten Querschnitt belastet das Biegemoment M_0 auf Biegung und die Kraft $P_t/2$ auf Zug. Aus der im Querschnitt 0—0 auftretenden Biegung entstehen in der äußeren Faser Druckkräfte, in der inneren Faser

Zugkräfte. Infolge der im entgegengesetzten Sinne wirkenden Biegung entstehen im Querschnitt 1—1 außen Druckspannungen, innen Zugspannungen. In der äußeren Faser errechnen sich die Spannungen außen zu

$$\sigma_{0k} = \frac{P_i}{2F} - \frac{M_0}{rF} - \frac{M_0}{\lambda Fr} \frac{e_1}{r + e_1} \tag{1}$$

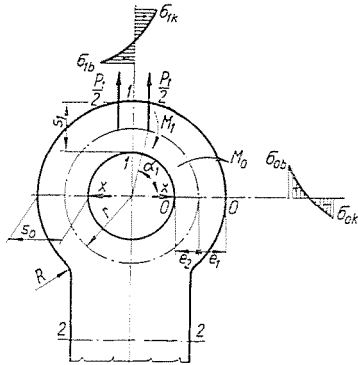


Abb. 10. Skizze für die Bemessung des geschlossenen Stangenkopfs bei konzentrierter Kraft

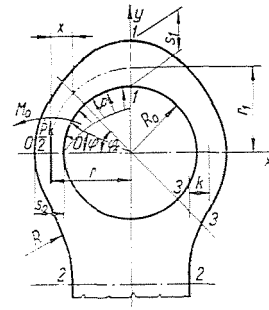


Abb. 11. Skizze für die Bemessung des geschlossenen Stangenkopfs bei linear verteilter Belastung

und in der inneren Faser zu

$$\sigma_{0b} = \frac{P}{2F} - \frac{M_0}{rF} + \frac{M_0}{\lambda Fr} \frac{e_2}{r + e_2} \tag{2}$$

und analog hierzu im Querschnitt 1—1 außen zu

$$\sigma_{1k} = - \frac{M_1}{rF} - \frac{M_1}{\lambda Fr} \frac{e_1}{r + e_1}, \tag{3}$$

innen hingegen zu

$$\sigma_{1b} = - \frac{M_1}{rF} + \frac{M_1}{\lambda Fr} \frac{e_2}{r + e_2}. \tag{4}$$

3.2 Die Berechnung des kleinen Kopfes kann auch erfolgen, indem man annimmt, daß der Kolbenbolzen die Belastung *linear verteilt* auf die Pleuelstange überträgt. Dies wird auch durch das im Zapfenspiel vorhandene Schmieröl gefördert, welches durch den entstehenden Öldruck zu einer gleichmäßigen Druckübertragung beiträgt. Setzt man also eine linear sich ändernde Belastungsverteilung voraus (Abbildung 11), kann man das Moment

M_0 — unter Annahme eines eingespannten Querschnitts 1—1 — anhand des Castigliano-Lehrsatzes bestimmen.

Die Deformationsarbeit, eingesetzt in den Differentialquotienten

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial M_0} &= \frac{1}{E} \int_0^{\pi/2} \frac{1}{J} \left[\frac{P_t}{2} x - M_0 - \frac{P_{tR}}{2} (\varphi_x - \sin \varphi_x) \right] (-R) d\varphi = \\ &= \frac{RP_t}{E} \int_0^{\pi/2} \left[\frac{x}{2} - \frac{R}{2} (\varphi_x - \sin \varphi_x) \right] \frac{1}{J} - \frac{M_0}{JP_t} \Big] d\varphi = 0. \end{aligned}$$

Aus dieser Gleichung kann das Moment M_0 durch graphische Bestimmung des Integrals ermittelt werden. Bei bekanntem Moment kann die Bemessung auf Grund der Beziehungen 1. und 2. vorgenommen werden.

Auf ähnliche Weise läßt sich durch Substitution von $\varphi_x = \frac{\pi}{2}$ das im Querschnitt 1—1 vorhandene Moment M_1 bestimmen. Ist dieses bekannt, kann man die Spannung in der äußeren Faser des Querschnitts 1—1 ermitteln.

3.3. In Anbetracht der verhältnismäßig großen Unsicherheit dieser Rechnungsmethode (die Größe α_1 ist unbekannt) sowie unter Berücksichtigung des Umstandes, daß sich die Berechnungen zur Ausbildung der Stangenöse in der Praxis vornehmlich auf reine Zugbeanspruchung erstrecken, geht die Berechnung im Querschnitt 0—0 von der Formel

$$\sigma_n = \frac{P_t}{2F} = \frac{P_t}{2 \cdot b \cdot s}, \quad (5)$$

im Querschnitt 1—1 von der Formel

$$\sigma_{\text{Biegung}} = \frac{P_t r}{2K} \quad (6)$$

aus, wobei in diesem Querschnitt ein auf zwei Stützen gelagerter und durch konzentrierte Kraft belasteter Träger angenommen wird. Diese Beziehung bietet ausreichende Sicherheit (K ist das Widerstandsmoment des Querschnitts 1—1).

4. Für Bemessungszwecke brauchbare Folgerungen aus der Versuchsreihe

Die Meßergebnisse der Prüfungen am geschlossenen kleinen Kopf, also am kritischsten Teil der Pleuelstange, können für Bemessungen verwendet

werden. Zweckmäßig wird man die Ergebnisse für ein Zapfenspiel von 0,1 mm auswerten, da das Spiel allgemein diesen Durchschnittswert besitzt. Die gewonnenen Erkenntnisse können wie folgt zusammengefaßt werden:

1. Unter der Druckspannung entsteht unter der Auflagerfläche des Zapfens eine Gleitspannung, weshalb bei der Herstellung nicht ebener Pleuelstangen die Stangenöse an der Verbindungsstelle des Schaftes verstärkt werden muß. Außerdem muß der Übergang vom Schaft zur Stangenöse sorgfältig und stufenförmig ausgeführt sein, weil zur Senkung der Schubspannung genügend Werkstoff verwendet werden muß.

Durch Vergrößerung des Krümmungsradius am Übergang erhöht sich die Tangentielspannung, die bei Druckbelastung an Punkt 2 der Stangenöse entsteht. Es ist deshalb zweckmäßig, die Querrippe des Pleuelstangenschafts am Stangenkopfanschluß zu verbreitern.

2. Die Zugbeanspruchung ist wesentlich kleiner als die Druckbeanspruchung. Die die Zugkraft aufnehmenden Querschnitte sind jedoch wesentlich kleiner als die Druckkraft-Aufnahmeflächen, weshalb Größe und Verteilung der auftretenden Spannungen im Hinblick auf den Stangenkopf kritisch sind.

Mit Hilfe der gemessenen Spannungswerte läßt sich anhand der bisherigen Rechnungsergebnisse feststellen, daß die nach den Formeln (5), (1) oder (2) berechneten Werte nicht der Wirklichkeit entsprechen, u. zw. selbst dann nicht, wenn man α_1 mit 65° ansetzt. Es ist also unrichtig, die Bemessung auf der Grundlage eines mit konzentrierter Kraft belasteten Krümmerträgers vorzunehmen. Rechnet man dagegen mit einer gleichmäßig sich ändernden Belastungsverteilung, zeigen die erhaltenen Spannungen an den Modellen M1 — M7 eine recht gute Übereinstimmung. Auch bei den Modellen M8 — M10 ist diese Übereinstimmung besser, als bei den übrigen Rechnungsverfahren.

Die Kontrollrechnung für den Querschnitt 0—0 kann also richtig mit dem Formfaktor aus Tabelle III vorgenommen werden. Wenn die Stangenkopfausbildung von den geprüften Modellen völlig abweicht, kann die Berechnung anhand der Formeln (8), (1) und (2) vorgenommen werden. Aus den Modellprüfung kann festgestellt werden, daß sich im Querschnitt 1—1 bei gleicher Stangenstärke (d. h. bei $s_0 = s_1$) wesentlich kleinere Hauptspannungsdifferenzen ergeben als im Querschnitt 0—0. Bei Bemessungen bildet also stets die Berechnung des Querschnitts 0—0 die erste Stufe.

Man kann festgestellt werden, daß die unter gewissen Vereinfachungsvoraussetzungen bestimmten Werte unwahrscheinlich groß erscheinen. Liegen genauere Zusammenhänge vor, so erhält man dementsprechend kleinere Werte. Gegenüber den gemessenen Werten ergeben sich dennoch erhebliche Abweichungen.

3. Prüft man die Ausbildung des Stangenkopfes, ergibt sich die Frage nach den Gesichtspunkten, nach denen die Bemessungen im Querschnitt 1—1 zu erfolgen haben.

Der Zapfen übt auf den oberen Teil des Stangenkopfes eine erhebliche, örtliche Belastung aus. Dasselbe ist im unteren Teil der Fall, wo Druckbelastung ausgeübt wird, es ist also eine Verstärkung des oberen Kopfteils erforderlich. Diese Forderung wird auch durch die Meßergebnisse bestärkt. Eine Verstärkung des Kopfes in diesem Querschnitt hat eine gewisse Starrheit zur Folge, aus der sich nachstehende Vorteile ergeben:

a) Im Querschnitt 1—1 entsteht selbst bei großem Zapfenspiel keine Faser $\sigma_1 - \sigma_2 = 0$.

b) Die Spannungsspitzen im Querschnitt 0—0 werden kleiner.

c) Die beim Übergang zwischen Schaft und Kopf entstehenden Spannungsspitzen werden kleiner, sie verringern sich auf die Hälfte.

d) Die in Punkt 3 des Stangenkopfes entstehende Spannung besitzt einen wesentlich geringeren Wert.

Prüft man nun diese Vorteile, gelangt man zu dem Schluß, daß eine Erhöhung der Abmessung s_1 über ein gewisses Maß hinaus keinen besonderen Vorteil bedeutet. Beim Prüfen der Tabellen kann festgestellt werden, daß ein Verhältnis s_1/s_0 in der Größenordnung 1—2 zweckmäßig ist, jedoch darüber hinaus nicht erstrebenswert erscheint bzw. unnötig ist.

Obige Feststellungen wirken sich am besten bei der Ausbildung des Stangenkopfes M 9 aus. Dieser Stangenkopf stellt also den günstigsten Typ der geprüften Modelle dar.

Zusammenfassung

Die Aufgabe der Prüfungen, die in den beiden Mitteilungen publiziert wurden, bestand in der Feststellung der Spannungsverhältnisse an geschlossenen Pleuelstangenköpfen von Verbrennungsmotoren mittlerer Drehzahl. Das Ziel konnte auf dem Wege spannungsoptischer Prüfungen erreicht werden, wobei die geprüften Modelle ebene Körper darstellten, denen gewisse Vereinfachungen zugrunde liegen. Die verschiedenen Pleuelstangenkopfausbildungen wurden Zug- und Druckbelastungen ausgesetzt. Auf diese Weise konnten in den kritischen Querschnitten die Spannungswerte, und aus diesen die Werte des Formfaktors ermittelt werden. Die Beanspruchung des geschlossenen Stangenkopfes wird auch durch das Spiel zwischen Zapfen und Bohrung beeinflußt. Aus diesem Grund wurden 6 verschiedene Zapfenspiele hergestellt, und die Messungen an diesen vorgenommen. Anhand dieser Messungen konnte der Einfluß des Zapfenspiels auf die Spannungsverteilung geklärt werden. Die Meßergebnisse wurden mit den Ergebnissen der üblichen Bemessungsformeln verglichen, so daß das Ausmaß der Näherung für die einzelnen Beziehungen bestimmt werden konnte. Die Meßdaten können zu einer Verfeinerung der Bemessungsmethoden verwendet werden.

Schrifttum

1. NEUBER, H.: Kerbspannungslehre. Springer-Verlag, 1958.
2. BOLEK, A.—JANATKA, J.: Části stroju IV. Prag, 1956.
3. HÄRTING, W.: Spannungsoptik im Motorenbau. Automobil-Industrie, Mai 1959.
4. WOLF, H.: Spannungsoptik, Springer-Verlag, 1961.
5. RAAB, W.: Sonderprobleme bei spannungsoptischen Untersuchungen von Maschinenteilen. Dissertation, Darmstadt, 1961.

6. Поляризационно - оптический метод исследования напряжений, Труды конференции 13—21 февраля 1958. Ленинград, 1960.
7. GRISKOWA, N. P.: Н. П. Дришкова: Оптический метод определения напряжений в деталях машин. Киев, 1953.
8. TRNKA, J.: Napjatost ojnice se šikmo dělenou hlavou. Strojirenstvi Nr. 12. 1962. Seite 899—905.
9. ТЕРРЕ, W.: Beitrag zur spannungsoptischen Untersuchung von Schalen, Dissertation. 1961.
10. ТНАММ, F.: A redukált feszültség megállapítása az optikai feszültségvizsgálat izokromátavonalai alapján. Doktorenarbeit, Budapest, 1961.

Árpád ZsÁRY, Budapest, XI. Műegyetem rkp. 3, Ungarn.