

27/14

Rabotnov, Ju.N., V.P. Rabinovič:

## Die Festigkeit von Scheiben bei Kriechverhältnissen

Es werden Ergebnisse von experimentellen Festigkeitsuntersuchungen von Scheiben bei Kriechverhältnissen erörtert. Es wird gezeigt, daß die gewählte Berechnungsmethode, die darauf beruht, daß die Dauerstandfestigkeit des Werkstoffes gleich der nach der ganz gewöhnlichen Alterungstheorie [1] berechneten maximalen Normalspannung ist, die Lebensdauer einer Scheibe mit befriedigender Genauigkeit voraussagt und man sie bei der Bestimmung der zulässigen Spannungen als Grundlage nehmen kann.

Ferner wird der Einfluß der Eigenschaften des Werkstoffes auf die Scheibenfestigkeit erörtert.

§ 1. Das Problem der Festigkeit einer Turbinenscheibe bei Kriechverhältnissen besteht aus zwei Aufgaben: 1. der Bestimmung der Spannungen und Formänderungen, 2. der Bestimmung der Voraussetzungen für den Bruch (die Zerstörung).

Mit der ersten Aufgabe befassen sich viele theoretische Arbeiten, experimentelle Untersuchungen über das Kriechen von Platten gibt es jedoch kaum [2, 3]; deshalb ist es das Hauptziel dieser Untersuchungen, die Richtigkeit der Spannungs- und Formänderungsbestimmung experimentell zu prüfen.

Als Ausgangstheorie für das Kriechen wurde die Alterungstheorie in ihrer allgemeinen Formulierung [1] genommen. Die auf dieser Theorie beruhenden Berechnungsmethoden für Scheiben sind einfach genug, die Rechnung selbst kann auf einer Elektronenrechenmaschine durchgeführt werden [4]. Auch sind diese Methoden besonders zuverlässig für die Bedingungen, wie sie in Turbinenscheiben gewöhnlich realisiert sind und bei

den unten beschriebenen Modellversuchen nachgebildet wurden. Die Spannungsverteilung ist im stationären Stadium nach allen Theorien gleich, ein Unterschied besteht darin, wie schnell sich der Spannungswechsel vollzieht. Nach der Alterungstheorie geht dieser Wechsel langsamer vor sich als nach anderen Theorien, deshalb zählt ein möglicher Fehler sozusagen zur Festigkeitsreserve. Andererseits beruht die Berechnung nach dieser Alterungstheorie auf der unmittelbaren Auswertung der ursprünglichen Kriechkurven, ohne daß eine analytische Approximation, die die Versuchswerte bisweilen stark entstellt, erforderlich ist.

Die zweite in dieser Untersuchung gestellte Aufgabe besteht in der Prüfung der Voraussetzungen für den Bruch von Scheiben beim Kriechen. Uns sind keinerlei experimentelle Untersuchungen der Dauerfestigkeit von Scheiben bekannt, die Zahl der theoretischen Arbeiten über dieses Problem ist auch nur sehr gering; in einigen von ihnen wird behauptet, daß die Bruchgefahr beim Kriechen lediglich nach der Formänderungsgröße der Scheibe zu bewerten ist, indem man sie mit der konstruktionsmäßig zulässigen Größe vergleicht, und daß ihr entsprechend der Grenzspannungszustand zu bestimmen ist. Für die heutzutage im Turbinenbau verwendeten Werkstoffe sind eine kleine Kriechverformungsgröße und Sprödbbruch charakteristisch; deshalb kann eine Festigkeitsbewertung nach der Formänderungsgröße nicht richtig sein. In dieser Arbeit wurde die Bedingung für den Bruch geprüft, die folgendermaßen formuliert ist: die maximale Normalspannung in dem am meisten belasteten Punkt der Scheibe ist gleich der der Arbeitszeit der Scheibe entsprechenden Dauerfestigkeit des Werkstoffes. Es ist klar, daß die Spannungsgröße unter Berücksichtigung des Kriechens berechnet werden muß.

Soweit in der gleichmäßig erwärmten Drehscheibe (Rotations-scheibe) beide Hauptspannungen positiv sind, bestimmt die größte Normalspannung die Voraussetzung sowohl für den Visko-sitäts- als auch für den Sprödbbruch, wenn man berücksichtigt, daß sich ersterer infolge der Schubspannungen, und zweiter infolge der Normalspannungen vollzieht. Die Hypothese, daß der Dauerbruch infolge von Sprödigkeit durch die größte Normal-

spannung bestimmt wird, wird experimentell bestätigt.

Bei der Formulierung der Voraussetzung für den Bruch wurde noch eine Annahme gemacht. Die Größe der Oberspannung, die der Dauerfestigkeit gegenüberzustellen ist, wird im Kriechprozeß ständig kleiner und verändert sich von der Ausgangsgröße, die dem elastischen (oder elastisch-plastischen) Zustand entspricht, zu der dem stationären Zustand entsprechenden Größe. Die von einer Reihe von Forschern vorliegenden Versuchswerte über die Festigkeit bei wechselnden Belastungen erlauben die Annahme, daß

(1)

wobei  $t_1$  die Haltezeit des Modells bei gegebener Temperatur und Spannung und  $\tau_1$  die Zeit bis zum Bruch bei den gleichen Bedingungen ist. Bei Anwendung dieser Abhängigkeit kann man die Größe einer in der Zeit bedingt konstanten Spannung  $\sigma_0$  erhalten, die in ihrer Wirkung der Wechsellastspannung  $\sigma$  äquivalent ist. Es gilt

(2)

wobei  $t$  die volle Arbeitszeit der Scheibe und  $k$  der Exponent in Abhängigkeit der Dauerfestigkeit von der Zeit (im Arbeitstemperaturbereich liegen die Werte von  $k$  für alle Werkstoffe zwischen 5 und 9) ist.

Bei allen von uns untersuchten Scheiben betrug die Differenz zwischen der Größe  $\sigma_0$  und der Spannung, die dem stationären Kriechstadium entsprach, nicht mehr als 3 v. H.; deshalb wurde die Veränderung des Spannungszustandes von uns nicht berücksichtigt. Mit Hilfe der oben zitierten Formel kann man die Spannungsänderungen in jedem einzelnen konkreten Fall ohne Mühe berücksichtigen.

§ 2. Die Untersuchungen wurden an vier verschiedenen im Turbinenbau verwendeten Werkstoffen durchgeführt: an perlitischem Stahl R-3\*, an austenitischem Stahl EI-405 und EI-572 (EI = Elektrostahl für Versuchszwecke) und an der Nickellegierung EI-437b. Alle Werkstoffe wurden einer normalen Wärmebehandlung unterzogen, und der Stahl R-3 wurde außerdem im versprödeten Zustand untersucht.

\* R ist eine Bez. f. Schnellarbeitsstahl

Alle Untersuchungen wurden an ebenen Scheibenmodellen mit einer zentralen Öffnung durchgeführt, um eine möglichst große Ungleichmäßigkeit bei der Spannungsverteilung zu erhalten. Der Durchmesser der Modelle betrug 280 mm. Ein Teil von ihnen war am Rand geschlitzt, wodurch die Schaufelbelastung imitiert wurde.

Die Versuche wurden in einer Beschleunigungsanlage (Durchgangsanlage) des CNIITMAS (Zentrales Forschungsinstitut für Technologie und Maschinenbau) durchgeführt [5]. Während der Versuche wurden Temperatur und Drehzahl der Modelle gemessen und beide Größen konstant gehalten. Die Untersuchungen wurden periodisch unterbrochen, die Modelle wurden demontiert und ihre Deformation wurde gemessen. Die meisten Modelle wurden bis zum Bruch gebracht, ein Teil von ihnen wurde aus dem Prüfprozeß herausgenommen und zur Bestimmung der bleibenden Spannungen durchgeschnitten. Nach den bleibenden Spannungen wurden die Spannungsgrößen beim Kriechen berechnet.

Im ganzen wurden 25 Scheiben geprüft, wobei die Prüfdauer von wenigen Stunden bis zu 2000 Stunden reichte. Gleichzeitig erfolgte eine Kriechprüfung an ungefähr 200 Modellen, die aus verschiedenen Metallstücken geschnitten waren - in verschiedenen Richtungen und aus verschiedenen Zonen - , wodurch hinreichend zuverlässige mittlere Werte der Werkstoffeigenschaften gewährleistet waren. Ein Teil der Modelle wurden im Institut für Mechanik der Akademie der Wissenschaften der UdSSR bei mehrachsigen (zusammengesetztem) Spannungszustand untersucht.

Die Kriechkurven wurden für die Berechnungen in Form von Abhängigkeiten  $\epsilon = f(t)$  für bestimmte Zeitmomente umgestaltet [1].

Die Rechnungen wurden auf der Elektronenrechenmaschine "Strela-3" mit Hilfe eines im Baranov-Institut von A.V. Amel'jancik für elastisch-plastische Scheibenberechnungen ausgearbeiteten Programms durchgeführt [4]. Dieses Programm entspricht genau der Kriechaufgabe einer Scheibe nach der vorausgesetzten Theorie.

Abbildung 1 zeigt einige zerstörte Scheibenmodelle. Abb. 1a: Scheibe aus EI-405 nach 432 Stunden Laufzeit. Auf der Scheibe trat an der Bohrung (Ausdrehung, Vertiefung) eine Spalte auf, die die Scheibe senkrecht zur Ebene durchschneidet. Der Bruch verläuft entlang der Korngrenze. Abb. 1b: Photographie einer Scheibe aus Stahl R-3 im versprödeten Zustand. Ihre größte Verformung betrug vor der Zerstörung nur 0,25 v. H. Abb. 1c: Bruch einer Scheibe aus Stahl R-3 im versprödeten Zustand. Der Bruch ist eben und verläuft senkrecht zur Scheibenebene. Das Grätenmuster bestätigt, daß sich der Zerstörungsherd an der Bohrung der Scheibe befindet.

§ 3. Auf Abbildung 2 wird der Spannungswechsel bei einigen der untersuchten Scheiben dargestellt. Links sind die normalen Spannungslinien in der Funktion des Scheibenradius für verschiedene Zeitpunkte gegeben. Die punktierte Linie stellt die Spannungsverteilungskurve unter der Voraussetzung einer elastischen Arbeit des Werkstoffes dar. In ihrer Nähe verläuft eine mit der Ziffer 7 bezeichnete Kurve, die sich auf den elastisch-plastischen Zustand der Scheibe unmittelbar nach der Belastung bezieht. Die horizontale Linie auf den graphischen Darstellungen links bezeichnet die mittlere Tangentialspannung. Alle übrigen Kurven auf den linken Abbildungen sind die unter Berücksichtigung des Kriechens des Werkstoffes für verschiedene Zeitpunkte berechneten Spannungen.

Bei der graphischen Darstellung für Stahl R-3 im versprödeten Zustand verschmelzen die Kurven für 10 und 200 Std., was bedeutet, daß der Spannungswechsel in den Scheiben bei 10 Stunden Laufzeit (Arbeit) praktisch beendet ist. Das ist auch aus dem rechten Teil der graphischen Darstellung ersichtlich, wo die Kurve für die Veränderung der maximalen Spannung der Scheibe in der Zeit gegeben ist. Analoge Kurven ergaben sich auch in den übrigen Fällen, d. h. der Spannungswechsel vollzog sich überall sehr schnell, er war nach einer Stunde oder nach wenigen Stunden beendet, und dann begann im wesentlichen ein stationäres Stadium.

Auf den graphischen Darstellungen rechts sind noch zwei

horizontale Linien eingezeichnet, die die Grenzen bezeichnen, innerhalb derer sich der Spannungswechsel vollziehen kann. Die obere Linie entspricht der maximalen Spannung in der Scheibe, die unter Voraussetzung der elastischen Arbeit des Werkstoffes errechnet wurde. Die untere Linie - die mittlere Spannungsgröße - entspricht einem anderen Grenzfall, nämlich dem Plastizitätszustand ohne Verfestigung<sup>Horftung?</sup>, bei dem sich der volle Spannungsausgleich vollzieht.

Vergleicht man die Kurven der Veränderung der Maximalspannung mit diesen Linien, stellt man ohne Schwierigkeiten fest, daß der Grad des Spannungswechsels in den verschiedenen Fällen unterschiedlich ist. Bei den Scheiben aus Stahl R-3 im versprödeten Zustand und bei den Scheiben aus der Nickellegerung 437b unterscheiden sich die maximalen Spannungen von den mittleren um 25 - 30 v. H. Trotzdem haben wir auch hier (ganz abgesehen von plastischen Scheiben) einen großen Spannungswechsel; im Vergleich zu elastischen Scheiben verringern sie sich ungefähr um das 1,5-fache.

Die Prüfung der Zuverlässigkeit dieser errechneten Werte erfolgte, wie bereits gesagt wurde, durch Messungen der bleibenden Spannungen.

Auf Abb. 3 sind die experimentellen und die errechneten Werte der bleibenden Spannungen für drei der untersuchten Scheiben aufgeführt. In allen drei Fällen ist eine gute Kongruenz zu beobachten. Die geringe Streuung hat Zufallscharakter.

§ 4. Auf Abb. 4 sind die Deformationen der Scheiben aus Stahl EI-405 und aus Stahl R-3 im versprödeten Zustand gegenübergestellt.

Ein Vergleich der errechneten und der experimentellen Deformationen zeigt sowohl am inneren als auch am äußeren Durchmesser, daß die errechneten Kurven in den Streuungsbereich der experimentellen Werte der Scheibenformänderungen fallen.

Es ist wichtig zu bemerken, daß in dem einen Fall (bei Stahl R-3 im versprödeten Zustand und bei der Legierung

EI-437b) die bleibenden Deformationen mit den elastischen kommensurabel sind (0,1 - 0,3 v. H.), im anderen Fall (R-3 bei normaler Wärmebehandlung und EI-405) haben die Deformationen eine Größenordnung von 2 v. H. und sogar 12 v. H. In allen Fällen erzielte man praktisch befriedigende Ergebnisse.

§ 5. Die Untersuchungsergebnisse (s. Tabelle) der Scheibenmodelle aus perlitischen und austenitischen Stählen für hinsichtlich der Plastizität verschiedene Zustände bestätigen die angenommene Voraussetzung für die Lösung (Anm. des Übers.: Wahrscheinlich handelt es sich um einen Druckfehler; Bei Änderung nur eines Buchstabens lautet es: angenommene Voraussetzung für den Bruch bzw. die Zerstörung.). Die Beziehung des maximalen Wertes von  $\sigma_{max}$  zu  $\sigma_{el}$  unterscheidet sich von 1 um nicht mehr als 6 v. H., was der Versuchsgenauigkeit nahekommt.

Aus der Tabelle gehen auch die Werte hervor, auf Grund derer man die z. Z. im Turbinenbau angenommenen Voraussetzungen für den Bruch bewerten kann, die auf einem Vergleich der maximalen Spannung - die unter Voraussetzung der elastischen Arbeit des Werkstoffes berechnet wurde - und der mittleren Spannung mit der Werkstofffestigkeit beruhen. Die Beziehung  $\sigma_{max} / \sigma_{el}$  ist, wie man leicht feststellt, bei weitem nicht konstant und ist in allen Fällen  $\sqrt{\quad}$  größer als eins. Diese Ergebnisse stimmen mit früher bei Kalt- und Kurzzeitprüfungen gewonnenen Resultaten überein. Sie sind damit zu erklären, daß selbst bei der geringen Plastizität, die die Scheiben aus der Nickellegierung EI-437b und aus Stahl R-3 im versprödeten Zustand charakterisierte, in ihnen ein Spannungswechsel vor sich geht. In dem einen Fall war er größer, im anderen kleiner, d. h. diese Voraussetzung ist für die Festigkeitsbewertung von Scheiben bei Kriechverhältnissen ungeeignet.

Was die mittlere Spannung anlangt, so ist ihre Verwendung als Voraussetzung für den Bruch in einem sehr begrenzten Bereich möglich, nämlich dann, wenn das Material die Spannungen auf ideale Weise wechseln kann (s. unten). Im an-

deren Fall garantiert die Anwendung dieser Voraussetzung für den Bruch nicht die Zuverlässigkeit der Konstruktion. Bei unseren Versuchen betrug der Fehler der Scheibenfestigkeitsbewertung für diese Voraussetzung 26 - 28 v. H. Für reale Turbinenscheiben kann er noch bedeutend größer sein.

§ 6. Wie aus obigen Ausführungen folgt, hängt die Scheibenfestigkeit sowohl von der Dauerfestigkeitscharakteristik des Werkstoffes als auch von seiner Spannungswechselfähigkeit ab, die man als Plastizitätsgrad bezeichnen könnte, jedoch nicht mit der Plastizität im üblichen Sinne, die gewöhnlich nach der Formänderungsgröße beim Bruch bewertet wird, gleichsetzen darf. Bei gleicher Dauerfestigkeit des Werkstoffes wird die Scheibe am festesten sein, deren Material ideal plastisch ist und bei der sich infolgedessen die Spannungen völlig ausgleichen. Wenn man die Festigkeit einer solchen Scheibe mit eins bezeichnet, wird die Festigkeit einer realen Scheibe immer kleiner als eins sein. Den kleinsten Wert für die relative Festigkeit erhält man dann, wenn sich in dem Werkstoff entsprechend dem Gesetz von Guk überhaupt kein Spannungswechsel vollzieht. Die Größe der relativen Festigkeit  $A$  wird durch die Beziehung der mittleren Spannung zur tatsächlichen, unter Berücksichtigung des Kriechens berechneten maximalen Spannung bestimmt.

Bei der Bestimmung des Spannungszustandes werden die realen Werkstoffeigenschaften bei den Berechnungsformeln durch die Größe

$$m =$$

berücksichtigt, die den Tangens des Neigungswinkels der Kurve  $\sigma = f(\epsilon)$  darstellt, die in § 2 erwähnt wurde und für logarithmische Koordinaten umformuliert wurde. Bei potentieller Abhängigkeit zwischen  $\sigma$  und  $\epsilon$ , ist diese Größe konstant und gleich dem Exponenten. Wenn man annähme,  $m$  sei konstant, und berechnet den Spannungszustand, ergibt sich, daß bei  $m$  gleich 8 und mehr sich die Spannungen in den geprüften Scheiben praktisch vollkommen ausgleichen und sich die Spannungsverteilung wie bei einem idealen plastischen Werkstoff vollzieht. Der Fall  $m = 1$  entspricht dem elastischen Zustand der Scheibe.



Auf Abb. 5 ist die Abhängigkeit der relativen Festigkeit der untersuchten Scheiben von der Größe des Parameters  $m$  graphisch dargestellt. Bei Veränderung der Größe  $m$  kann sich die Scheibenfestigkeit ungefähr um das 2-fache verändern.

So hängt die Scheibenfestigkeit von zwei Parametern ab, von der Dauer-Genauigkeit (Anm. des Übers.: Hier handelt es sich wohl wiederum um einen Druckfehler. Bei einer kleinen Veränderung der Buchstaben hieße es: Dauerfestigkeit) und der durch die Größe  $m$  charakterisierten Spannungswchselfähigkeit.

Der Parameter  $m$  hängt praktisch mit der Plastizität des Werkstoffes zusammen, je größer die Plastizität, desto größer ist gewöhnlich  $m$ . Angesichts der Tatsache jedoch, daß kein exakter Zusammenhang zwischen ihnen besteht, ergibt sich keine genaue Abhängigkeit der relativen Scheibenfestigkeit von irgendeiner allgemeinen Plastizitätscharakteristik, z. B. von der Verlängerung bei kurzfristigem oder dauerndem Reißen. Wir weisen darauf hin, daß in einer Reihe praktischer Fälle  $m$  dem Exponent  $n$  in der Abhängigkeit der Kriechgeschwindigkeit von den Spannungen nahekommt oder fast gleich ist.

Offensichtlich sind die Größen  $m$  und  $n$  für ein und denselben Werkstoff nicht konstant. Abgesehen davon, daß sie von der Temperatur abhängig sind, hängen sie auch in großem Maße von den Spannungen ab, indem sie mit wachsenden Spannungen größer werden.

Im Laufe der Zeit wird der Parameter  $m$  bei ein und derselben Spannung größer und strebt gegen eine konstante Größe. Dementsprechend vollzieht sich der Spannungsausgleich in der Scheibe. Er hört auf, und das stationäre Kriechstadium beginnt, wenn  $m$  seinen Grenzwert erreicht, d. h. wenn die Kriechkurven im Bereich der in der Scheibe auftretenden Spannungen ähnlich werden.

§ 7. Die dargelegte Berechnung ermöglicht es, den Einfluß einer zentralen Öffnung auf die Scheibenfestigkeit zu

bewerten. Das geht aus Abbildung 6 hervor, wo die Berechnungsergebnisse für Scheiben mit verschiedenen Öffnungsdurchmessern bei verschiedenen Größen für  $m$  dargestellt sind. Der Einfluß der Öffnung ist auf der Abbildung ausgedrückt in der Beziehung der zentrifugalen Bruchbelastung der Scheibe mit Loch zu derjenigen für eine Scheibe, die kein Loch hat und aus einem Material besteht, das die Spannungen vollkommen ausgleicht. Diese Beziehung ist durch den Koeffizienten  $B$  bezeichnet. An der Abszissenachse ist die Beziehung  $\Delta$  Öffnungsdurchmesser zum Außendurchmesser der Scheibe abgetragen. Offensichtlich hängt der Einfluß der Öffnung auf die Scheibenfestigkeit nicht nur von dem Anteil der Öffnungsfläche ab (wie das die Theorie der mittleren Spannungen besagt), sondern auch von  $m$ . Je kleiner  $m$  ist, desto stärker ist dieser Einfluß. Nur bei großen Werten für  $m$  ist die Theorie der Mittelwerte und die auf ihr beruhende Abhängigkeit der Scheibenfestigkeit von der Öffnungsgröße richtig (Anmerkung des Übers.: Vielleicht wurde hier das Wort "Spannungen" ausgelassen, sodaß es lauten müßte "Theorie der mittleren Spannungen...").

Ohne daß wir in diesem Aufsatz ausführlicher auf andere Probleme des Einflusses der Scheibenkonstruktion auf ihre Festigkeit eingehen, können wir behaupten, daß bei Kriechverhältnissen unter Voraussetzung guter Werkstoffeigenschaften die Spannungen auch in ebenen Scheiben wechseln, d. h. daß das Prinzip der gleichen Festigkeit in einem bestimmten Maße nicht durch die Form der Scheibe, sondern durch ihr Material gewährleistet werden kann.

Auf Grund der durchgeführten Untersuchungen ist es zu empfehlen, Festigkeitsberechnungen von Kriechverhältnissen ausgesetzten Scheiben nach der hier angewandten Methode durchzuführen, die auf der Alterungstheorie in ihrer allgemeinen Formulierung [1] und jener Voraussetzung für den Bruch beruht, die besagt, daß die maximale (Tangential- oder Radial- [6]) Spannung in dem am meisten belasteten Punkt der Scheibe gleich der Dauerfestigkeit des Werkstoffes ist.

Eingegangen am 20.III.1959

L I T E R A T U R

1. Rabotnov, Ju.N.: Rasč<sup>✓</sup>et detalej mašin na polzučest'.  
Izv. AN SSSR, OTN, Nr 6, 1948.
2. Boguslavskij, P.Ja.: Issledovanie polzučesti elementov  
turbin. Tezisy dokladov na Vsesojuznom sove-  
ščani<sup>✓</sup>i po teorii uprugosti, stroitel'noj me-  
chanike i teorii plastičnosti. Izd. AN SSSR,  
1950.
3. s. Original
4. Amel'jančik, A.V.: Rasč<sup>✓</sup>et na pročnost' diskov turbomašin  
na matematičeskoj mašine. Izv. AN SSSR,  
OTN, Mehanika i mašinostroenie, Nr 1,  
1959.
5. Merinov, G.N., V.P. Rabinovič: Razgonnaja ustanovka  
CNIITMAŠ, fil. VINITI, Nr 59 - 102/5, 1959.
6. Rabinovič, V.P.: Pročnost' diskov s bol'šimi radial'nymi  
naprjaženijami. Energomašinostroenie,  
Nr 3, 1959.

Anmerkung Seite 94

<sup>1</sup> Siehe auch informacionnye pis'ma Nr 272 und 330 des CBNTI ONIITMAS 1958: Issledovanie prochnosti turbinnych diskov und E.P. Unksov: Nekotorye voprosy metallovedenija, technologii i ispytanija zaroprocnych splavov, Veröffentlichung des CBNTI ONIITMAS Nr 43 - 17, 1957.

Abbildung 1.

Photographische Aufnahme zersörter Scheiben.

- a) Scheibe aus Stahl EI-405 nach 432 Stunden Prüfzeit;
- b) Scheibe aus Stahl R-3 im versprödeten Zustand;
- c) Bruch einer Scheibe.

Abbildung 2.

Spannungswechsel in den Scheiben.

Oben: Scheibe aus Stahl R-3 bei normaler Wärmebehandlung;

Unten: Scheibe aus dem gleichen Werkstoff im versprödeten Zustand. Prüftemperatur 575 ° C.

- 1 Dauerfestigkeit des Werkstoffes
- 2 mittlere Tangentialspannung
- 3 die unter Berücksichtigung des Kriechens für verschiedene Zeitpunkte berechneten Spannungen
- 4 elastische Spannungen
- 5 maximale
- 6 maximale
- 7 Anfangsspannungen
- a Scheibe R-1
- b Scheibe R-2
- c Scheibe R-5
- d Scheibe R-6
- e die Scheiben R-7 und R-8

Abbildung 3.

Experimentelle Prüfung des Spannungswechsels.

Links: in der Scheibe aus der Nickellegierung EI-437b

Mitte: aus Stahl R-3 im versprödeten Zustand

Rechts: aus Stahl EI-405

Abbildung 4.

Deformationen der Scheiben aus Stahl EI-405 (oben) und aus R-3 im versprödeten Zustand (unten).

1 errechnete Kurve

2 experimentelle Punkte und Kurven

a am Innenradius der Scheibe

b am Außenradius

Der Streubereich der experimentellen Werte wurde schraffiert.

Abbildung 5.

Abhängigkeit der relativen Scheibenfestigkeit A vom Parameter m.

Kurve 1 bezieht sich auf eine ebene Scheibe mit zentraler Öffnung  $d=0,25$  vom Außendurchmesser. Kurve 2 gilt für eine Scheibe, die sich von der ersten durch Schaufelbelastung (der Rand ist bis zu  $d_n=0,89$  des Außendurchmessers geschlitzt) unterscheidet.

Abbildung 6.

Einfluß einer zentralen Öffnung auf die Scheibenfestigkeit.

1 nach der Theorie der mittleren Spannungen

2 nach der Elastizitätstheorie

Anmerkung des Übersetzers

Bei den Worten in  $\langle \rangle$  handelt es sich entweder um eine Erläuterung des Übersetzers oder um eine Übersetzungsvariante, wobei in  $\langle \rangle$  die wörtliche Übersetzung gegeben ist.

Die Zahlen am Rand in  $( )$  wurden zur Kennzeichnung der Formeln im Text eingeführt.

9. III. 67

Zernberg-Wieße

## О ПРОЧНОСТИ ДИСКОВ В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ

Ю. Н. РАБОТНОВ, В. П. РАБИНОВИЧ

(Москва)

Излагаются результаты экспериментальных прочностных исследований дисков в условиях ползучести. Показано, что принятая методика расчета, основанная на равенстве предела длительной прочности материала максимальному нормальному напряжению, подсчитанному по простейшей теории старения [1], дает удовлетворительную точность предсказания долговечности диска и ее можно использовать как основу при выборе допускаемых напряжений.

Отмечено влияние свойств материала на прочность диска.

§ 1. Проблема прочности турбинного диска, находящегося в условиях ползучести, состоит из двух задач: 1) определения напряжений и деформаций и 2) установления условий разрушения.

Первой задаче посвящено много теоретических работ, а экспериментальных исследований ползучести дисков почти нет [2,3], поэтому описываемые ниже исследования имели своей первой целью опытную проверку достоверности определения напряжений и деформаций.

В качестве исходной теории ползучести принималась теория старения в ее общей формулировке [1]. Основанные на этой теории методы расчета дисков достаточно просты, сам расчет может быть произведен на электронной вычислительной машине [4]. С другой стороны, представляется, что эти методы наиболее надежны для тех условий, которые обычно реализуются в дисках турбин и которые воспроизводились при описываемых ниже модельных испытаниях. Дело в том, что распределение напряжений в установившейся стадии по всем теориям оказывается одинаковым, вся разница состоит в том, насколько быстро происходит перераспределение напряжений. По теории старения это перераспределение оказывается более медленным, чем по другим теориям, поэтому возможная ошибка идет как бы в запас прочности. С другой стороны, расчет по данной теории старения базируется на непосредственном использовании первичных кривых ползучести, не требуя какой-либо их аналитической аппроксимации, которая иногда сильно искажает опытные данные.

Вторая задача, поставленная в настоящем исследовании, — это проверка условий разрушения дисков при ползучести. Нам не известны какие-либо опытные исследования длительной прочности дисков, теоретических работ по этому вопросу также очень мало, в некоторых из них указывается, что опасность разрушения при ползучести следует оценивать только величиной деформации диска, сравнивая ее с конструктивно допустимой, и что по ней следует определять предельное напряженное состояние. Для современных материалов, используемых в турбостроении, характерны малая величина деформации ползучести и хрупкое разрушение, поэтому оценку прочности по величине деформации нельзя считать правильной. В данной работе проверялось условие разрушения, сформулированное следующим образом: макси-

мальное нормальное напряжение в наиболее нагруженной точке диска равняется пределу длительной прочности материала, соответствующему времени работы диска<sup>1</sup>. Очевидно, что величина напряжения должна рассчитываться с учетом ползучести.

Поскольку во вращающемся равномерно нагретом диске оба главных напряжения положительны, наибольшее нормальное напряжение определяет условие как вязкого, так и хрупкого разрушения, если считать, что первое происходит за счет касательных, а второе за счет нормальных напряжений. Гипотеза о том, что длительное разрушение хрупкого типа определяется наибольшим нормальным напряжением, подтверждается опытом.

При формулировке условия разрушения сделано еще одно допущение. Величина наибольшего напряжения, которую следует сопоставлять с пределом длительной прочности, непрерывно уменьшается в процессе ползучести от начальной величины, соответствующей упругому (или упруго-пластическому) состоянию до величины, соответствующей установившемуся состоянию. Имеющиеся опытные данные о прочности в условиях переменных нагрузок, принадлежащие ряду исследователей, позволяют считать, что

$$a_k = \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{\tau_i} = 1$$

где  $t_i$  — время выдержки образца при заданном уровне температуры и напряжения, а  $\tau_i$  — время до разрушения в этих условиях. Пользуясь этой зависимостью, можно найти величину некоторого условного постоянного во времени напряжения  $\sigma_0$ , эквивалентного по своему действию переменному напряжению  $\sigma$ . Оказывается, что

$$\sigma_0 = \left( \frac{1}{\tau_p} \int_0^{\tau_p} \sigma^k dt \right)^{1/k}$$

где  $\tau_p$  — полное время работы диска, а  $k$  — показатель степени в зависимости длительной прочности от времени (в рабочем диапазоне температур для всех материалов значения  $k$  обычно колеблются от 5 до 9).

Для всех исследованных нами дисков величина  $\sigma_0$  отличалась от напряжения, соответствующего установившейся стадии ползучести не более, чем на 3%, поэтому история изменения напряженного состояния нами не учитывалась. При помощи вышеприведенной формулы это легко сделать в каждом конкретном случае.

§ 2. Испытания проводились на четырех различных материалах, применяемых в турбостроении: перлитной стали Р-3, аустенитных сталях ЭИ-405 и ЭИ-572 и никелевом сплаве ЭИ-4376. Все материалы были подвергнуты стандартной термообработке, а сталь Р-3, кроме того, испытывалась в охрупченном состоянии.

Желая приблизиться к эксплуатационным условиям, испытания проводили при температурах: 575° — для стали Р-3, 650° — для сталей ЭИ-405 и ЭИ-572, 700° — для сплава ЭИ-4376.

Все испытания проводились на плоских моделях дисков с центральным отверстием для получения наибольшей неравномерности распределения напряжений. Диаметр моделей был равен 280 мм. Часть из них была надрезана на ободе; этим имитировалась лопаточная нагрузка.

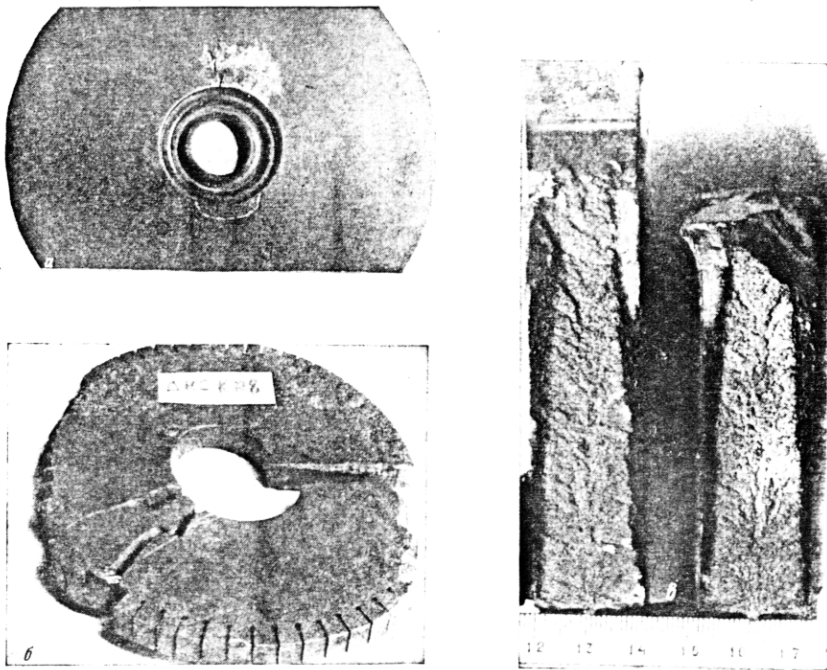
Опыты производились в разгонной установке ЦНИИТМАШа [5]. В процессе испытаний измерялись и поддерживались постоянными тем-

<sup>1</sup> См. также информационные письма № 272 и 330 ЦБНТИ ЦНИИТМАШа за 1958 г. «Исследование прочности турбинных дисков» и брошюру Е. П. Унксова «Некоторые вопросы металловедения, технологии и испытания жаропрочных сплавов», издание ЦБНТИ ЦНИИТМАШа № 43—17, 1957.



пература и числа оборотов моделей. Испытания периодически прерывались, модели демонтировались и измерялась их деформация. Большинство моделей доводилось до разрушения, часть снималась с испытаний и разрезалась для определения остаточных напряжений. По остаточным напряжениям вычислялась величина напряжений в условиях ползучести.

Всего было испытано 25 дисков, длительность испытаний была в диапазоне от нескольких часов до двух тысяч часов. Одновременно испытано



Фиг. 1. Фотографии разрушенных дисков. *a* — диск из стали ЭИ-405 после 432 час. испытания; *b* — диск из стали Р-3 в охрупченном состоянии; *c* — излом диска

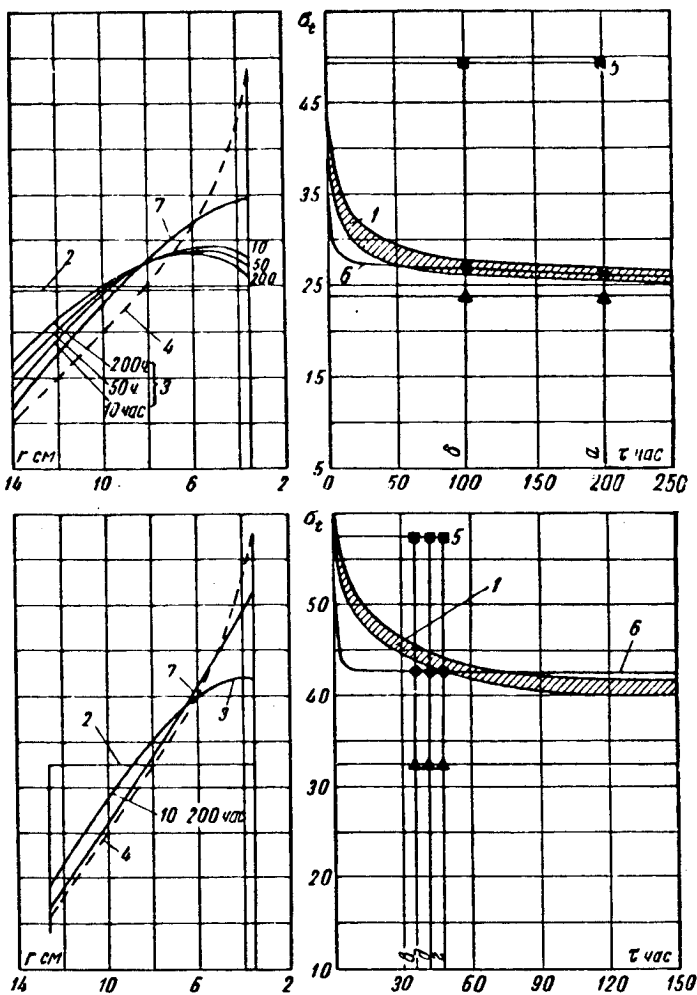
около 200 образцов на ползучесть, вырезанных из различных поковок, в разных направлениях и из разных зон, что позволило получить достаточно надежные средние величины свойств материалов. Часть образцов исследовалась в Институте механики АН СССР в условиях сложного напряженного состояния.

Кривые ползучести для расчетов перестраивались в виде зависимостей  $\sigma = f(\epsilon)$  для определенных моментов времени [1].

Расчеты производились на электронной вычислительной машине «Стрела-3» при помощи программы, разработанной для упруго-пластических расчетов дисков в Институте им. Баранова А. В. Амелянчиком [4]. Эта программа целиком подходит к задаче о ползучести диска по принятой теории.

На фиг. 1 показано несколько разрушенных моделей дисков. На фиг. 1*a* — диск из стали ЭИ-405 после 432 час. испытания. На диске у расточки появилась трещина, перерезающая диск перпендикулярно его плоскости. Излом проходит по границам зерен. На фиг. 1*b* приведена фотография диска из стали Р-3 в охрупченном состоянии. Его наибольшая деформация перед разрушением составила всего 0.25%. На фиг. 1*c* показан излом диска из стали Р-3 в охрупченном состоянии. Излом плоский, перпендикулярен плоскости диска. На нем видна «елочка», подтверждающая, что очаг разрушения находится на расточке диска.

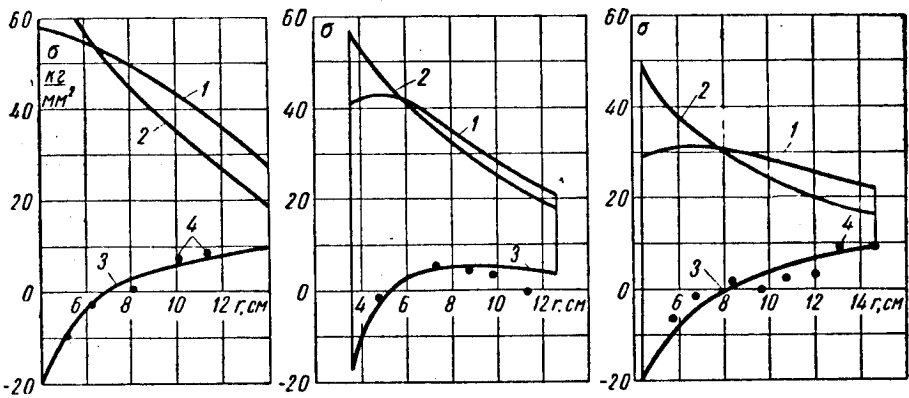
§ 3. На фиг. 2 показано перераспределение напряжений в ряде исследованных дисков. В левой части графиков даны обычные эпюры напряжений в функции радиуса диска для разных моментов времени. Пунктиром на графиках показана кривая распределения напряжений, подсчи-



Фиг. 2. Перераспределение напряжений в дисках. Вверху — из стали Р-3 в стандартной обработке. Внизу — из той же стали, но в охрупченном состоянии. Температура испытаний — 575° С. 1 — длительная прочность материала  $\sigma_{дл}$  кг/мм<sup>2</sup>, 2 — среднее тангенциальное напряжение  $\sigma_t^{ср}$  кг/мм<sup>2</sup>, 3 — напряжения, подсчитанные с учетом ползучести  $\sigma_t^п$  для разных моментов времени, 4 — упругие напряжения  $\sigma_t^у$ , 5 — максимальные  $\sigma_t^у$ , 6 — максимальные  $\sigma_t^п$ , 7 — напряжения в начальный момент времени; а — диск Р-1, б — диск Р-2, в — диск Р-5, г — диск Р-6, д — диски Р-7 и Р-8

танных в предположении упругой работы материала. Около нее проходит кривая, обозначенная цифрой 7 и относящаяся к упруго-пластическому состоянию диска немедленно после нагружения. Горизонтальная линия на этих графиках — среднее тангенциальное напряжение. Все остальные кривые на левых частях графиков — напряжения, подсчитанные с учетом ползучести материала для разных моментов времени.

На графике для стали Р-3 в охрупченном состоянии кривые для 10 и 200 час. сливаются, это означает, что перераспределение напряжений в дисках практически заканчивалось к 10 час. их работы. Это видно также на правой части графика, где дана кривая изменения во времени максимального напряжения в диске. Аналогичные кривые были получены и



Фиг. 3. Опытная проверка перераспределения напряжений. Слева — на диске из сплава ЭИ-4376, в центре — из стали Р-3 в охрупченном состоянии и справа — из стали ЭИ-405; 1 —  $\sigma_r^m$ ; 2 —  $\sigma_r^t$ ; 3 —  $\sigma_r^o$  (расчетная кривая), 4 — опытные точки

в остальных случаях, т. е. везде перераспределение напряжений происходило очень быстро, — оно заканчивалось в течение одного или нескольких часов и далее, по существу, начиналась установившаяся стадия.

На правых частях графиков приведены еще две горизонтальные линии, указывающие пределы, в которых может происходить перераспределение напряжений. Верхняя линия соответствует максимальному напряжению в диске, подсчитанному в предположении упругой работы материала. Нижняя линия — величина среднего напряжения — соответствует другому крайнему случаю — состоянию пластичности без упрочнения, когда происходит полное выравнивание напряжений.

Сопоставляя кривые изменения максимального напряжения с этими линиями, нетрудно заметить разную степень перераспределения напряжений в разных случаях. В дисках из стали Р-3 в охрупченном состоянии и из сплава ЭИ-4376, максимальные напряжения отличаются от средних на 25—30%. Тем не менее и здесь (не говоря уже о пластичных дисках), мы имеем большое перераспределение напряжений — по сравнению с упругими они уменьшаются примерно в 1.5 раза.

Проверка надежности этих расчетных данных была осуществлена, как указывалось, измерениями остаточных напряжений.

На фиг. 3 приведены опытные и расчетные значения остаточных напряжений для трех исследованных дисков. Во всех случаях можно отметить хорошее совпадение. Небольшой разброс носит случайный характер.

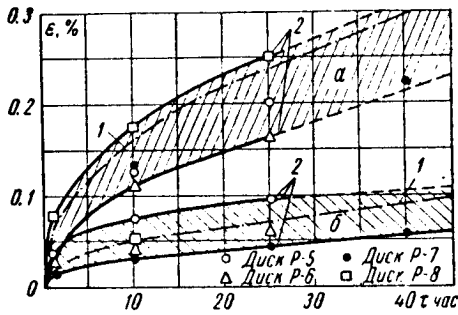
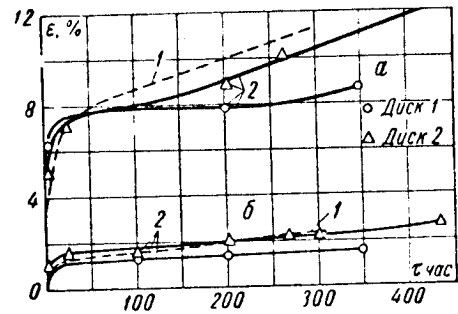
§ 4. На фиг. 4 сопоставлены деформации дисков из стали ЭИ-405 и из стали Р-3 в охрупченном состоянии.

Сопоставление расчетных и опытных деформаций как на внутреннем, так и на наружном диаметрах показывают, что расчетные кривые укладываются в полосу разброса опытных значений деформации дисков.

Важно заметить, что в одних случаях (сталь Р-3 в охрупченном состоянии и сплав ЭИ-4376) остаточные деформации соизмеримы с упругими (0.1 ÷ 0.3%), в других (Р-3 в стандартной термообработке и ЭИ-405) — деформации имеют величину порядка 2% и даже 12%. Во всех случаях результаты получаются практически удовлетворительными.

§ 5. Результаты испытания (см. таблицу) моделей дисков, выполненных из сталей перлитного и аустенитного класса в разных по пластичности состояниях, подтверждают принятое условие разрешения. Отношение максимального  $\sigma_{\text{пк}}$   $\sigma_{\text{дл}}$  не отличается от 1 более чем на 6%, что близко к точности экспериментов.

В таблице приведены также данные, позволяющие оценить принимаемые сейчас в практике турбостроения условия разрушения, основанные на сравнении с прочностью материала максимального напряжения, подсчитанного в предположении упругой работы материала и среднего напряжения. Отношение  $\sigma_y$  к  $\sigma_{\text{дл}}$ , как не трудно заметить, далеко не постоянно и во всех случаях значительно превосходит единицу. Эти результаты совпадают с ранее полученными при холодных и кратковременных испытаниях. Объясняются они тем, что даже при той небольшой пластичности, которой обладали диски из сплава ЭИ-4376 и стали Р-3 в охрупченном состоянии, в них происходит перераспределение напряжений. В одних случаях оно было больше, в других меньше, т. е. это условие непригодно для оценки прочности дисков, подверженных ползучести.



Фиг. 4. Деформации дисков из сталей ЭИ-405 (вверху) и Р-3 в охрупченном состоянии (внизу); 1 — расчетная кривая, 2 — опытные точки и кривые: а — на внутреннем радиусе диска, б — на наружном. Заштрихована полоса разброса опытных значений

Что же касается среднего напряжения, то его применение оказывается возможным в весьма ограниченных пределах — когда материал может идеально перераспределять напряжения (см. ниже). В противном слу-

Материал	Модель	$\sigma_y / \sigma_{\text{дл}}$	$\sigma_c / \sigma_{\text{дл}}$	$\sigma_{\text{п}} / \sigma_{\text{дл}}$
Сталь Р-3 в станд. термообр.	Р-1	1.78	0.89	0.95
	Р-2	1.85	0.92	1.00
	Р-15	1.67	>0.83	>0.94
Сталь Р-3 в охрупч. состоянии	Р-5	1.32	0.72	0.96
	Р-6	1.35	0.74	0.98
	Р-7	1.33	0.73	0.97
	Р-8	1.33	0.73	0.97
Сталь ЭИ-405	62/2	1.89	0.93	1.03
	62/3	1.92	0.96	1.05
	64/2	1.92	0.96	1.05
	1	1.83	0.94	1.04
	2	1.87	0.96	1.06
Сталь ЭИ-572	50	1.52	0.81	0.95
Сплав ЭИ-4376	77	1.57	0.82	1.02
	79	>1.38	>0.72	>0.93
	78	>1.44	>0.82	>0.95
	80	1.52	0.86	0.97
	83	1.58	0.89	1.01

чае использование этого условия разрушения не гарантирует надежности конструкции. В наших опытах ошибка в оценке прочности дисков по этому условию доходила до 26÷28%. Для реальных турбинных дисков она может оказаться значительно большей.

§ 6. Как следует из вышеизложенного, прочность диска зависит как от характеристик длительной прочности материала, так и от способности его перераспределять напряжения, которую можно условно назвать степенью пластичности, однако нельзя отождествлять с пластичностью в обычном понимании, оцениваемой обычно по величине деформации при разрушении. При одинаковой длительной прочности материала наиболее прочным будет диск, материал которого является идеально пластическим и, следовательно, напряжения выравниваются полностью. Если принять прочность такого диска за единицу, прочность реального диска будет всегда меньше единицы. Наименьшее значение относительной прочности получится тогда, когда материал следует закону Гука и никакого перераспределения напряжений не происходит. Величина относительной прочности  $A$  определяется отношением среднего напряжения к действительному максимальному напряжению, подсчитанному с учетом ползучести.

При определении напряженного состояния в расчетных формулах свойства реального материала учитываются величиной

$$m = \frac{\sigma}{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{d\sigma}$$

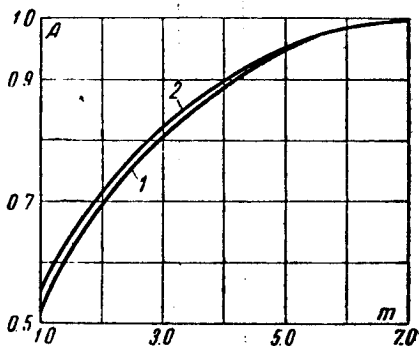
представляющей собою тангенс угла наклона кривой  $\varepsilon = f(\sigma)$ , упоминавшейся в § 2 и перестроенной в логарифмических координатах. Если зависимость между  $\sigma$  и  $\varepsilon$  является степенной, то эта величина постоянна и равна показателю степени. Если принять условно, что  $m$  постоянно, и произвести расчет напряженного состояния, то оказывается, что при  $m$ , равном 8 и более, напряжения в испытанных дисках практически полностью выравниваются и распределение напряжений получается таким же, как для идеального пластического материала. Случай  $m = 1$  соответствует упругому состоянию диска.

На фиг. 5 приведен график зависимости относительной прочности испытанных дисков от величины параметра  $m$ . С изменением величины  $m$  прочность диска может изменяться примерно вдвое.

Таким образом, прочность диска зависит от двух параметров, его длительной прочности и способности перераспределять напряжения характеризуемой величиной  $m$ .

Параметр  $m$  практически связан с пластичностью материала, чем больше пластичность, тем обычно больше  $m$ . Однако, ввиду отсутствия сколько-нибудь строгой связи между ними, четкой зависимости относительной прочности диска от какой-либо общепринятой характеристики пластичности, например от удлинения при кратковременном или длительном разрыве, не получается. Отметим еще, что показатель  $m$  в ряде практических случаев близок или даже равен показателю  $n$  в зависимости скорости ползучести от напряжений.

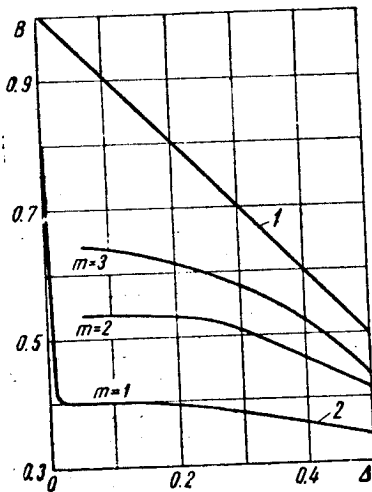
Очевидно, что величины  $m$  и  $n$  для одного и того же материала непостоянны. Помимо того, что они зависят от температуры, они в большой степени зависят и от напряжений, увеличиваясь при увеличении последних.



Фиг. 5. Зависимость относительной прочности диска  $A$  от параметра  $m$ . Кривая 1 построена для плоского диска с центральным отверстием  $d = 0,25$  от  $d$  наружного. Кривая 2 построена для диска, отличающегося от первого наличием лопаточной нагрузки (обод прорезан до  $d_n = 0,89$   $d$  наружного)

С течением времени при одном и том же напряжении параметр  $m$  увеличивается, стремясь к постоянной величине. Соответственно происходит выравнивание напряжений в диске. Оно заканчивается, и начинается установившаяся стадия ползучести, когда параметр  $m$  достигает своего предельного значения, т. е. когда кривые ползучести в диапазоне напряжений, имеющих место в диске, становятся подобными.

§ 7. Изложенный расчет позволяет оценить влияние центрального отверстия на прочность диска. Это показано на фиг. 6, где приведены результаты расчетов дисков с различными диаметрами отверстий при разных величинах  $m$ . Влияние отверстия на фигуре выражено в отношении разрушающей центробежной нагрузки диска с отверстием к таковой для диска без отверстия и выполненного из материала, полностью выравнивающего напряжения. Это отношение обозначено коэффициентом  $B$ . По оси абсцисс отложено отношение  $\Delta$  диаметра отверстия к наружному диаметру диска. Видно, что влияние отверстия на прочность диска зависит не только от доли площади отверстия (как это предполагает теория средних напряжений), но и от показателя  $m$ . Чем меньше  $m$ , тем сильнее это влияние. Только при больших  $m$  оказывается справедливой теория средних и основанная на ней зависимость прочности диска от размера отверстия.



Фиг. 6. Влияние центрального отверстия на прочность диска; 1 — по теории средних напряжений, 2 — по теории упругости

Не останавливаясь в данной статье сколько-нибудь подробно на других вопросах задачи о влиянии конструкции диска на его прочность, можно заметить, что в условиях ползучести при хороших свойствах материала напряжения перераспределяются и в плоских дисках, т. е. принцип равнопрочности в определенной степени может быть обеспечен не за счет формы диска, а за счет его материала.

На основании проведенных исследований можно рекомендовать проведение прочностных расчетов дисков, подверженных ползучести по использованной здесь методике, основанной на теории старения в ее общей формулировке [1] и условии разрушения, полагающем равенство пределу длительной прочности материала максимального (тангенциального или радиального [6]) напряжения в наиболее нагруженной точке диска.

Поступило 20 III 1959

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Работнов Ю. Н. Расчет деталей машин на ползучесть. Изв. АН СССР, ОТН, № 6, 1948.
2. Богуславский П. Я. Исследование ползучести элементов турбин. Тезисы докладов на Всесоюзном совещании по теории упругости, строительной механике и теории пластичности, Изд. АН СССР, 1950.
3. Wahl A. M., Sankey W. O., Manjoine M. I., Shoemaker E. Creep Tests of rotating Disks at elevated Temperatures and Comparison with Theory. J. Appl. Mech., Trans. ASME, v. 76, pp. 225—235, 1954.
4. Амелянчик А. В. Расчет на прочность дисков турбомашин на математической машине. Изв. АН СССР, ОТН, Механика и машиностроение, № 1, 1959.
5. Меринов Г. Н. и Рабинович В. П. Разгонная установка ЦНИИТМАШ, фил. ВИНТИ, № 59—1(2/5), 1959.
6. Рабинович В. П. Прочность дисков с большими радиальными напряжениями. Энергомашиностроение, № 3, 1959.