

Analyse des Einflusses der Eigenspannung und des Oberflächenreliefs auf die Spannungsverteilung unter Anwendung von FEM Simulation

J. Malina¹⁺²
M. Behúlová³
H. Stanková¹⁺²
B. Mašek¹⁺²

¹ University of West Bohemia, Univerzitní 22, 306 14 Plzeň, Czech Republic,

² TU Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, LWM, Erfenschlager Str. 73, D-09107 Chemnitz,
Germany

³ Slovak University of Technology, Faculty of Materials Science and Technology, Paulinska
16, 917 24 Trnava, Slovakia

mali@centrum.cz , hstankova@kmm.zcu.cz, bohuslav.masek@wsk.tu-chemnitz.de,
maria.behulova@stuba.sk

Kurzfassung

Der Oberflächenzustand und die Behandlungsweise beeinflussen beträchtlich die Lebensdauer sowohl der Maschinenteile als auch der kompletten Konstruktion. Auch kleinere Unebenheiten der Oberfläche und die während des ganzen Prozesses in das Material eingetragenen Eigenspannungen können sich auf den Endzustand der Spannungen unter Dauerbelastung auswirken. Die Erfassung des Endspannungszustandes im Mikroumfang der realen Oberflächenschicht ist ein anspruchsvolles technisches Problem, welches in der Praxis sehr schwer nachzuweisen ist. Eine Alternative bietet die Anwendung der FEM Simulation. In diesem Beitrag werden Simulationsmodelle einer Probe bei einem Umlaufbiegeversuch vorgestellt. Es werden Spannungsfelder für Probenvarianten mit einem realen Oberflächenrelief und einer ideal glatten Oberfläche verglichen. Die integrierten Werte der Eigenspannungen sind mit Hilfe der Beugung von Röntgenstrahlen an den beiden unterschiedlichen Probenoberflächen errechnet worden.

1. Einleitung

Ein Parameter, welcher beeinflusst, ob das gegebene Erzeugnis in der Praxis durchsetzbar ist, ist seine Lebensdauer. Eine Möglichkeit, wie die Lebensdauer des Erzeugnisses bestimmt werden kann, ist der Umlaufbiegeversuch. Dieser Versuch wird häufig beim Prüfen solcher Bauteile eingesetzt, die im Betrieb durch ein Biegemoment bei der Rotation des Bauteiles belastet werden. Unter diese Erzeugnisgruppe fallen beispielsweise Getriebewellen, Wind-Kraftanlagen, Teile von Maschinenanlagen usw..

2. Experiment

Für die Verifikation der Möglichkeit, ein geeignetes Simulationsmodell für die Analyse von komplexen, auf den Spannungszustand wirkenden Einflüssen zusammensetzen, wurde das Beispiel des Umlaufbiegeversuchs genutzt.

2.1. Umlaufbiegeversuch

Bei dem Umlaufbiegeversuch wird die Belastung der Probe durch ein Hebelsystem mit einem Belastungsgewicht erzeugt, das in der Probe das erwünschte Biegemoment einstellt (Abb. 1).

Die wichtigsten Parameter, die die Dauerfestigkeit beeinflussen, sind der Oberflächenzustand und die Oberflächenqualität. Die reale Oberflächenqualität unterscheidet sich wesentlich von der ideal glatten Oberfläche, und zwar in Abhängigkeit von der für die Erzeugnisherstellung angewandten Technologie.

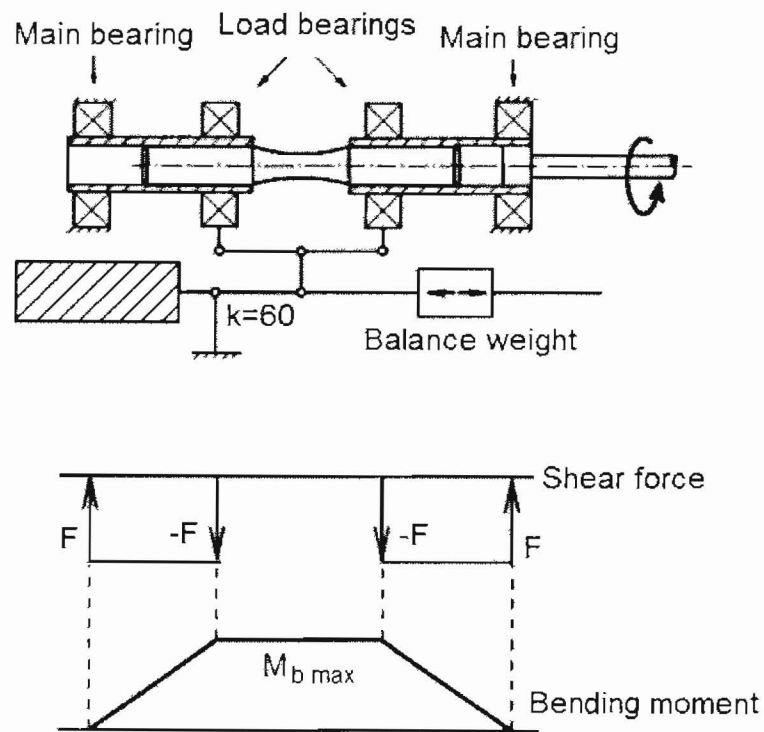


Abb. 1: Belastungsschema Umlaufbiegeprobe

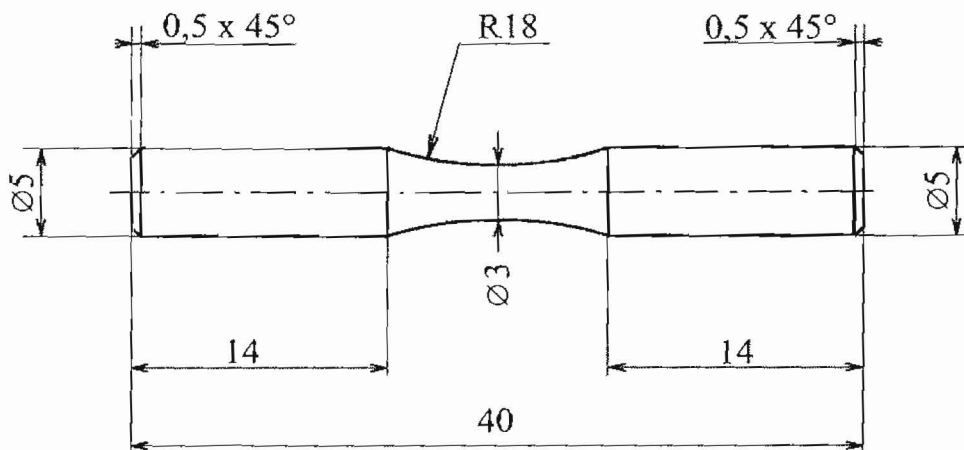


Abb. 2: Probengeometrie; Vorlage für das Simulationsmodell

Bei der Oberflächenbearbeitung entstehen auf der Oberfläche Unebenheiten (Abb. 3), die zur Spannungskonzentration führen und wirken dadurch auch als Schwachstelle.

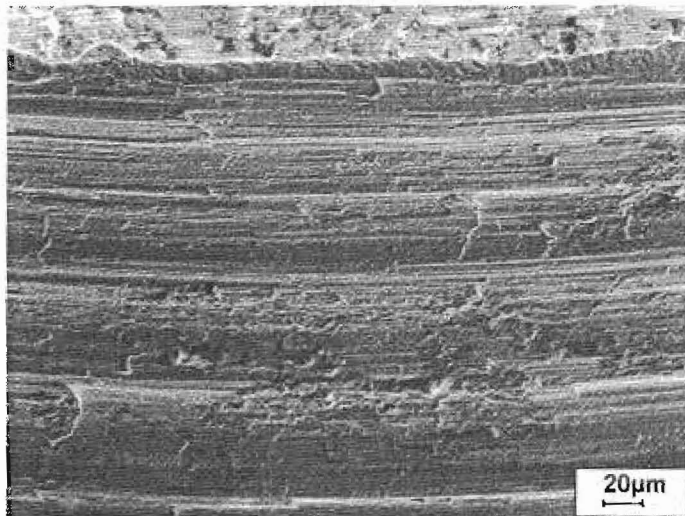


Abb. 3: Oberflächenrelief einer Probe aus dem Stahl 20MoCrS4, feingedreht

Außer dem Relief der Oberfläche spielt auch die Größe und der Charakter der Eigenspannungen eine wesentliche Rolle, die sowohl bei der Oberflächenbearbeitung als auch bei der Halbzeugherstellung entstehen können. Die Druckeigenspannungen führen in den meisten Fällen zu einer Erhöhung der Lebensdauer des Bauteiles. Im Gegensatz dazu führen Zugeigenspannungen zu ihrer Verringerung.

Durch die Superposition aller Spannungskomponenten entsteht in realen Bauteilen ein komplizierter Spannungszustand. Um die Intensität des Einflusses einzelner Faktoren, die in der Praxis schwer qualifizierbar sind, feststellen zu können, wurde eine Analyse mit Unterstützung der FEM Simulation durchgeführt.

3. Parameter und Randbedingung für die FEM Simulationen

3.1. Ermittlung des Profils des Oberflächenreliefs

An einer realen Probe aus dem Stahl 20MoCrS4 wurde die Oberflächenrauheit nach dem Feindreihen ermittelt (Abb. 4). Die erworbenen Daten wurden in das Simulationsmodell derart überführt, dass sie das Realrelief des Modellbauteiles nachbilden. Das Prüfen verschiedener Varianten ergab sich als beste Lösung für die Methode „spline“ [Ansys], die auf korrekte Weise den Charakter der Oberflächenunebenheiten in einem senkrechten Schnitt zu der Schnittbewegung während des Drehens erfasste.

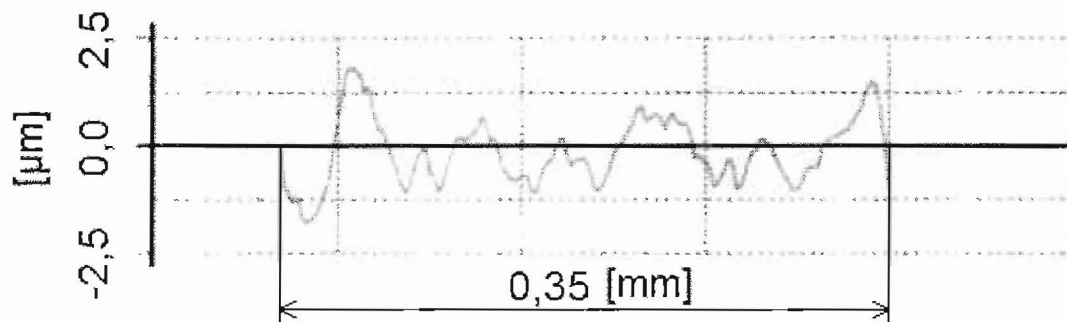


Abb. 4: Oberflächenrelief der Probe

3.2. Ermittlung der Eigenspannungen

Zur Ermittlung der Größe der Eigenspannungen in dem beobachteten Oberflächengebiet wurde die Beugung von Röntgenstrahlen ausgenutzt. Der ermittelte Eigenspannungswert ist der Mittelwert aus drei Messungen. Zuerst wurde die Eigenspannungsgröße auf der Oberfläche der Probe festgestellt. Danach wurden schrittweise die Oberflächenschichten mit einem Schritt von 0,02 mm abgeätzt und die Spannung festgestellt. Nachdem in acht Schritten 0,16 mm von der Oberfläche entfernt wurden, sank der Eigenspannungswert auf 1 MPa (Abb. 5). Das Ätzen wurde eingesetzt, um eine eventuelle Aufnahme von neuen Spannungen zu vermeiden. Die gemessene lokale Inhomogenität des Spannungsfeldes in einer Tiefe von 0,06 und 0,08 mm unter der Oberfläche wurde im verwendeten FEM Modell ebenfalls berücksichtigt.

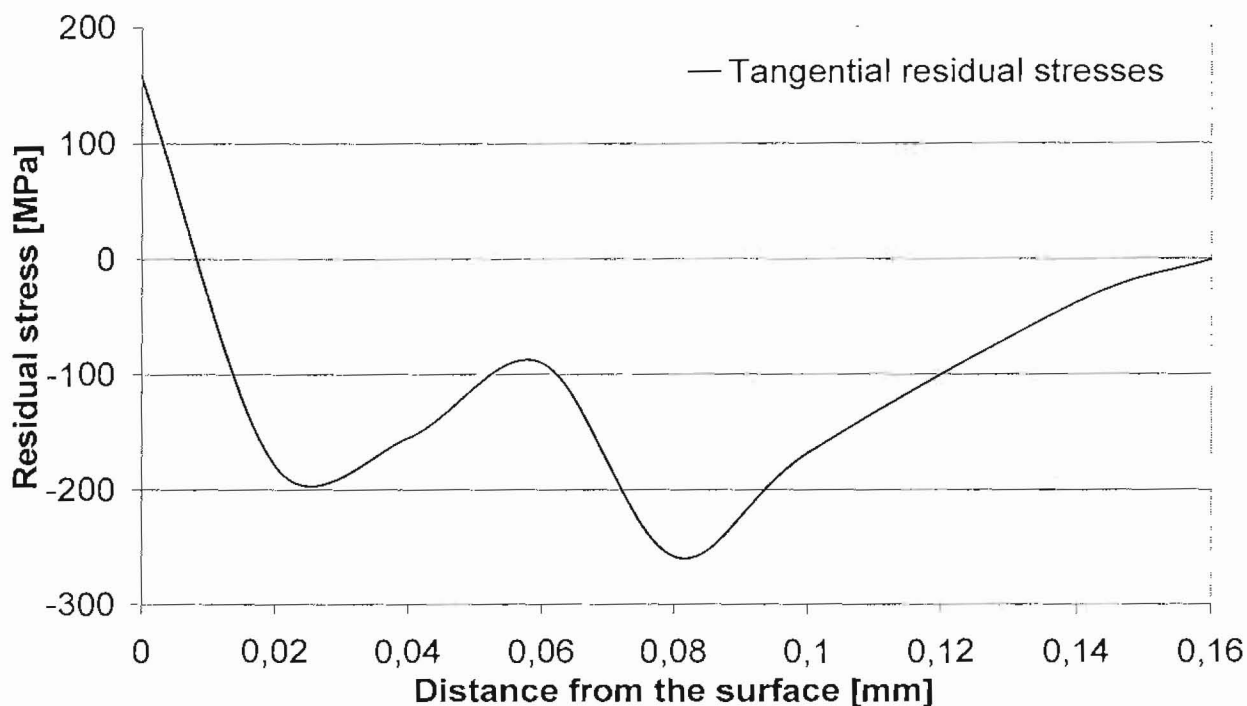


Abb. 5: Ermittelter Eigenspannungsverlauf im Oberflächengebiet der Probe

4. FEM Modell

Insgesamt wurden drei Simulationsmodelle erstellt, die die Entstehung der realen Spannungen unter den wirkenden Einflüssen erstellt. Die simulierte Probengeometrie ist in (Abb. 2) dargestellt. Das erste Modell verfügte über eine ideal glatte Oberfläche ohne Eigenspannung und diente zur Feststellung der grundlegenden theoretischen Spannungen, die nur durch Belastungskräfte entstanden sind, ohne weitere Einflüsse. Das zweite Modell, mit einer ideal glatten Oberfläche wurde um den Einfluss der Eigenspannung, die mittels der Beugung von Röntgenstrahlen festgestellt wurde, erweitert. In dem dritten Modell wurde weiterhin der Einfluss der durch das Oberflächenrelief bedingten Spannungskonzentration berücksichtigt.

Die Modelle wurden zweidimensional, axial und zentralsymmetrisch simuliert. Die Elementtypen wurden so gewählt, dass es möglich war, das Modell als achsensymmetrisch zu simulieren. Um den Einfluss des Oberflächenreliefs mit einer exakten Genauigkeit bestimmen zu können, war es notwendig, eine Optimierung der Elementgröße durchzuführen. An der Oberfläche wurden Elemente mit einer Größe von 0,002 mm benutzt. Schrittweise wurde die Elementgröße auf den Wert von zirka 0,01 mm in einer Tiefe von 0,06 mm unter der Oberfläche vergrößert. Der Rest des Umfangs wurde durch Elemente ähnlicher Größe vernetzt.

Für die Vorgabe der Eigenspannungswerte wurde ein Algorithmus für die Schaffung eines thermisch induzierten Spannungsfeldes benutzt. Für einzelne Abstände von der Oberfläche wurden Temperaturen eingestellt, die die gleichen, durch die Beugung der Röntgenstrahlen gemessenen Werte entsprechenden Spannungen induzieren. Mittels dieser Methode wurde in der Probe ein Spannungsfeld geschaffen, das dem realen Zustand entspricht.

5. Ergebnisse

Alle Ergebnisse wurden durch ähnliche Simulationsmodelle bei gleichen Verankerungs-, Belastungs- und Vernetzungsweisen erreicht. Aus den Ergebnissen ergibt sich, dass bei gleich bleibender Belastung der maximale Spannungswert des glatten Modells 49 MPa erreicht. Im Falle des realen Oberflächenreliefs, variiert die Oberflächenspannung in einem Abstand von 30 MPa im Lokalminimum bis zu zirka 70 MPa im Lokalmaximum. Der Oberflächeneinfluss hat bis zu einer Tiefe von zirka 0,02 mm (Abb. 6) Auswirkung auf die Spannung. Die gleiche Wirkung hatte das Oberflächenrelief bei dem Modell mit Eigenspannung gezeigt (Abb. 7).

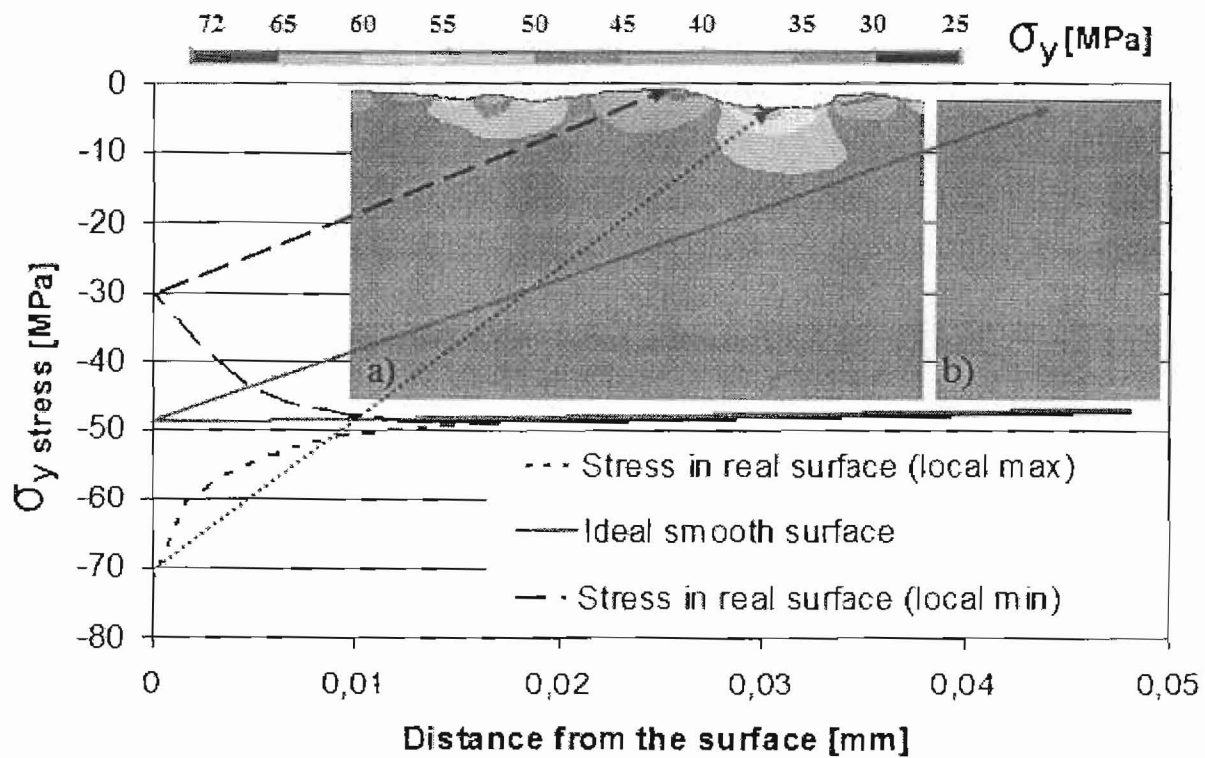


Abb. 6: Spannung σ_y über Oberflächenabstand
a) Probe mit einem Oberflächenrelief b) ideal glatte Probe

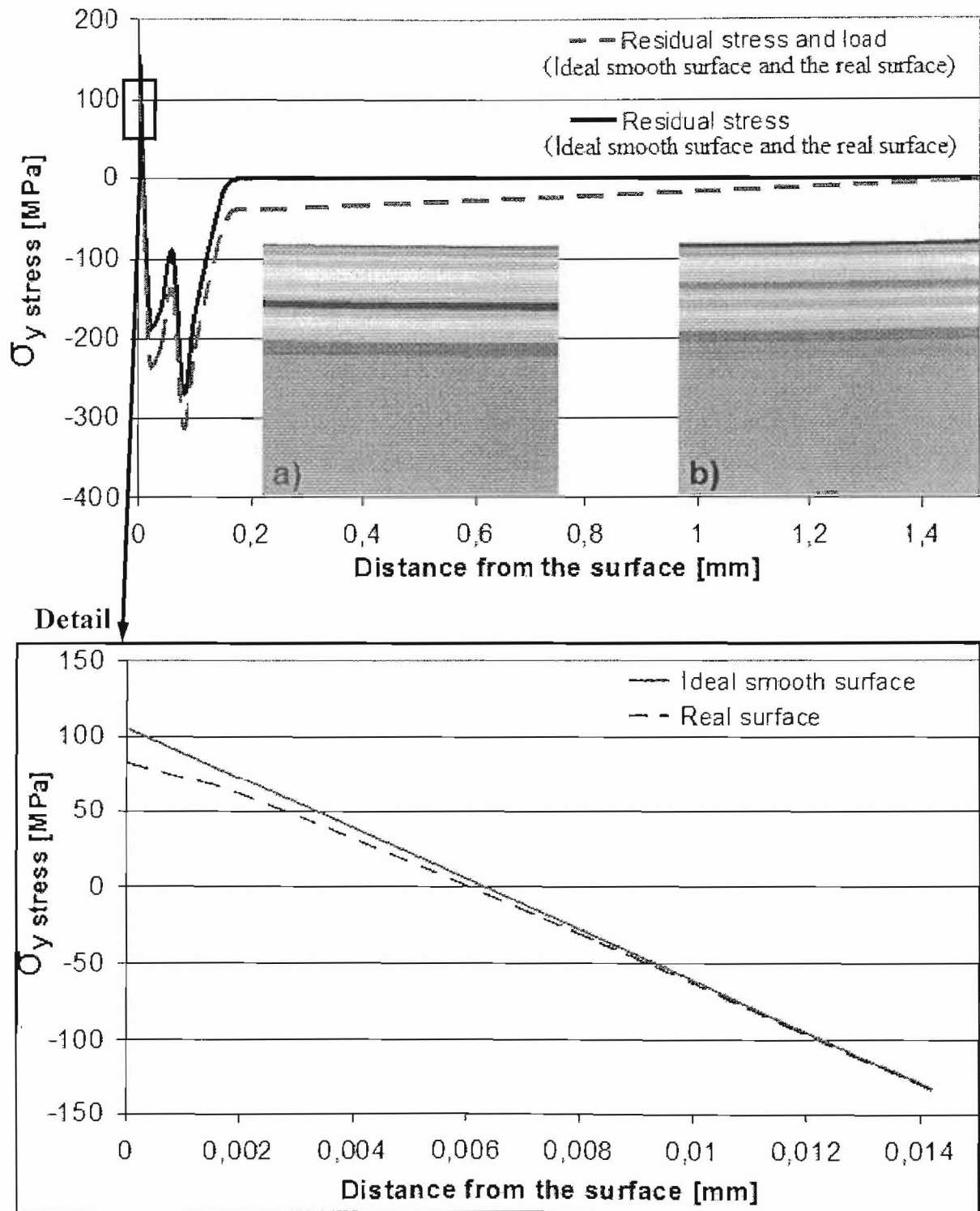


Abb. 7: Eigenspannungsvergleich im a) belasteten b) unbelasteten und Modell

6. Zusammenfassung

Es wurde bestätigt, dass es möglich ist, ein Simulationsmodell mit den erforderlichen Eigenschaften zusammenzustellen. An den Ergebnissen der Simulationen sind die Unterschiede zwischen Proben mit ideal glatter Oberfläche und solchen mit einem Oberflächenrelief sehr gut ablesbar. Mit den gegebenen Rahmenbedingungen sind es die Spannungsunterschiede zwischen den verschiedenen Oberflächenstrukturen, die besonders ins Gewicht fallen.

Danksagung

Diese Arbeit und die vorgestellten Ergebnisse wurden mit der Hilfe des Projekts IM06032 entwickelt.