

Thermo-mechanical Description of Rubber Curing and Tire Production Simulation

Thermo-mechanische Beschreibung der Gummivulkanisation und Reifenproduktionssimulation

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
an der Fakultät Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden
eingereichte

Dissertation

von
Dipl.-Ing. Thomas Berger
geboren am 17. Juli 1990 in Dippoldiswalde

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske
Technische Universität Dresden
Stéphane Lejeunes, PhD, Habil
Aix-Marseille Université
Assoc. Prof. Dr.-Ing. Hüsnü Dal
Middle East Technical University

Tag der Einreichung: 2. Februar 2024

Tag der Verteidigung: 17. Juni 2024

Summary

Tire production is a complex process that has significant influence on the final tire shape and its mechanical behavior. The raw natural rubber compounds are assembled together with the reinforcements to form the green tire. Subsequently, it is pressed into a mold by a large inner pressure to obtain its final shape. By increasing the temperature in the mold, the rubber molecules build up cross-links with each other. This vulcanization significantly changes the mechanical characteristics of rubber, from soft elastoviscoplastic to stiffer viscoelastic behavior. This process takes place in a closed system, which is impossible to be observed directly. For optimization of the tire production process, reliable numerical methods are required to represent it by finite element simulations.

In the present thesis, descriptions of the thermo-mechanical behavior of uncured and cured rubber are presented. A thermodynamically consistent framework is derived to combine both formulations for a numerical representation of the vulcanization process and any intermediate state between uncured and cured rubber. It is assumed that the stored energy remains constant during vulcanization. This is fulfilled by a plastic strain and its evolution law is derived directly from the conservation of energy. By introducing the plastic strain, the change of the equilibrium configuration during curing is described and thermodynamic consistency is ensured. The rubber curing framework is formulated to independently identify the parameters of the uncured and cured material descriptions. Based on experimental observations, an efficient parameter identification strategy is proposed for each rubber phase as well as for the time- and temperature-dependent curing kinematics.

Due to the soft elastoviscoplastic mechanical behavior of uncured rubber and the severe loading conditions during the production, the green tire undergoes large deformations. Classical finite element formulations cannot realistically represent these deformations, which leads to element distortions, artificial stiffening and divergence. In the present work, an arbitrary LAGRANGIAN EULERIAN formulation is presented. In this approach, the material deformation is partially decoupled from the computational mesh, which is smoothed to reduce element distortions. A newly developed projection algorithm is shown, which ensures a consistent transfer of the deformation history. Tires have a sophisticated tread pattern that improves the tire traction at wet conditions. Therefore, the mold geometry is complex and its representation by linear functions is disadvantageous for the finite element method. A smooth representation of the surface is achieved by using non-uniform rational B-splines.

The proposed formulations and implementations are illustrated by several numerical examples. The tire production simulation of an axisymmetric tire and a tire with a non-axisymmetric tread pattern is realized and shown. The numerical representation is used to investigate the influence of the production on the final tire characteristics and to identify possible failures.

Zusammenfassung

Die Reifenproduktion ist ein komplexer Prozess, der einen signifikanten Einfluss auf das Fahrverhalten des Reifens hat. Während der Produktion wird der unvernetzte Gummi zusammen mit den Verstärkungslagen zu einem grünen Reifen zusammengesetzt. Anschließend wird dieser bei hohem Druck in einer Heizpresse in seine endgültige Form gebracht. Bei hoher Temperatur bilden die Gummimoleküle Brückenbindungen miteinander. Dieser Vulkanisations- oder Vernetzungsprozess verändert die mechanischen Eigenschaften des Gummis erheblich, von einem weichen elastoviskoplastischen zu einem steiferen viskoelastischen Werkstoff. Durch die geschlossene Heizpresse lässt sich dieser Prozess nicht direkt beobachten. Um die Reifenproduktion zu verbessern, werden zuverlässige numerische Methoden benötigt, um sie mit der Finiten Elemente Methode zu simulieren.

In der vorliegenden Arbeit werden numerische Beschreibungen für das Materialverhalten von unvernetztem und vernetztem Gummi präsentiert. Eine thermodynamisch konsistente Formulierung wird hergeleitet, um beide Materialmodelle miteinander zu verbinden. Damit kann der Vulkanisationsvorgang und jeder Zwischenzustand des Gummis numerisch beschrieben werden. Unter der Annahme, dass die im Gummi gespeicherte Energie während des Vernetzungsprozesses konstant bleibt, entwickelt sich eine plastische Deformation, die die bleibende Formänderung infolge der Vulkanisation beschreibt. In der vorgestellten Vulkanisationsformulierung können die Parameter für die Materialmodelle des unvernetzten und des vernetzten Gummis unabhängig voneinander identifiziert werden. Basierend auf experimentellen Untersuchungen wird eine effiziente Parameteridentifikationsstrategie für beide Gummiphasen und für das zeit- und temperaturabhängige Vulkanisationsverhalten vorgestellt.

Aufgrund des hohen Innendrucks und des weichen elastoviskoplastischen Materialverhaltens von unvernetztem Gummi treten während der Einförmung des grünen Reifens große Deformationen auf. Klassische Finite Elemente Implementierungen sind nicht in der Lage diese großen Deformationen realistisch zu beschreiben, denn sie führen zu Netzverzerrungen, künstlicher Versteifung und Divergenz. In der vorliegenden Arbeit wird eine arbiträre LAGRANGE EULER Formulierung präsentiert. In dieser wird die Deformation des Materials teilweise von dem repräsentativen Netz entkoppelt. Dadurch können Netzverzerrungen mit geeigneten Methoden reduziert werden. Ein neuentwickelter Projektionsalgorithmus wird vorgestellt, der die Materialdeformationen zuverlässig in das modifizierte Netz überführt. Reifen besitzen ein hochentwickeltes Laufprofil für gutes Fahrverhalten bei Nässe. Deshalb ist die Geometrie der Heizpresse sehr komplex und die Beschreibung mittels linearer Ansatzfunktionen nachteilig für die Anwendung der Finiten Elemente Methode. Eine kontinuierliche Beschreibung der Oberfläche wird mithilfe von nicht-uniformen rationalen B-Splines realisiert.

Die vorgestellten Formulierungen und deren Implementierungen werden anhand von numerischen Beispielen illustriert. Der Produktionsprozess eines axensymmetrischen Reifens und eines Reifens mit Laufprofil wird realisiert und vorgestellt. Die numerische Beschreibung wird verwendet, um den Einfluss des Produktionsprozesses auf das Verhalten des fertigen Reifens zu untersuchen und um mögliche Defekte zu entdecken.